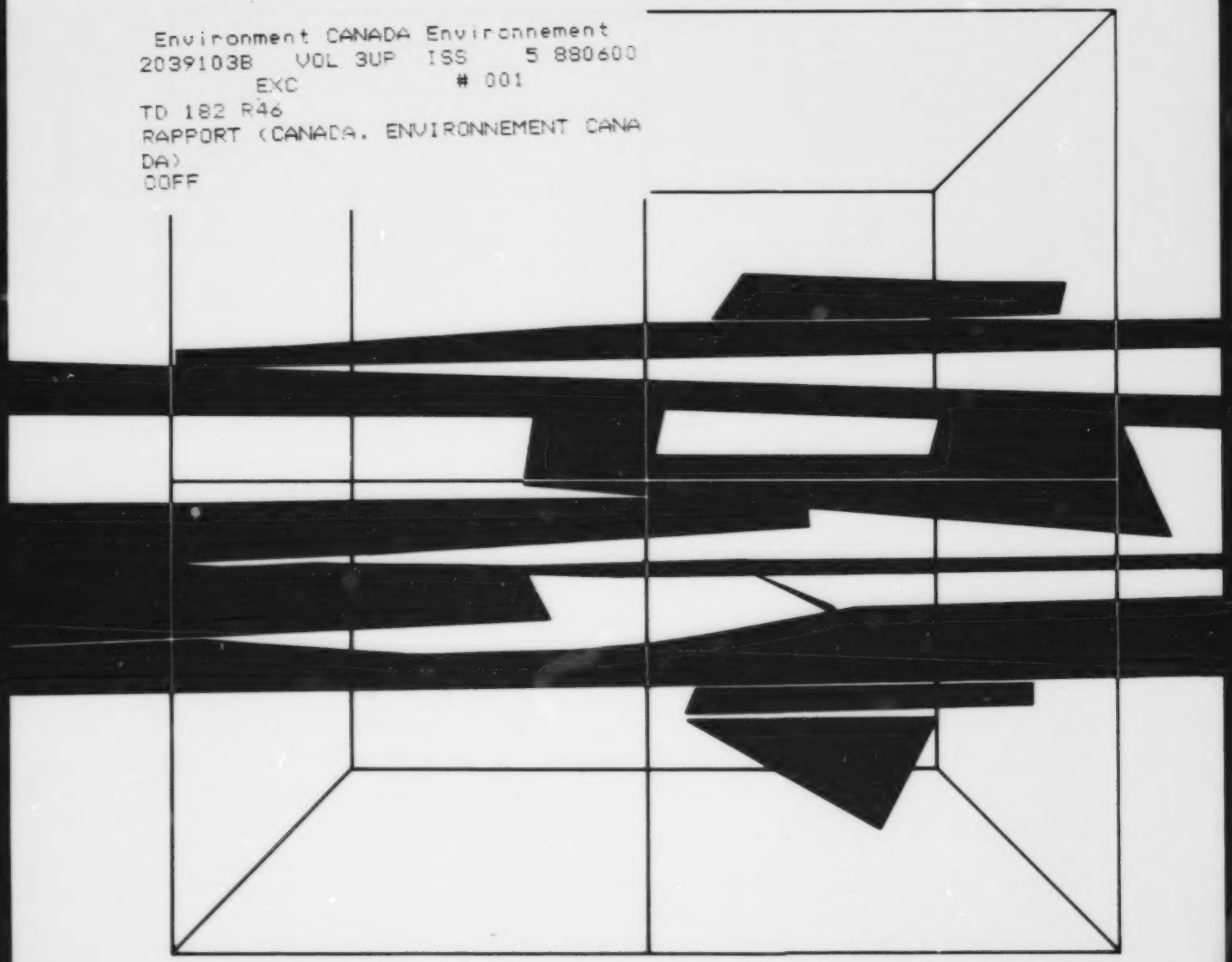
Le programme national d'essais et d'évaluation des incinérateurs: évaluation des émissions à l'incinérateur de déchets non conditionnés de la ville de Québec

Sommaire des données et résultats

Rapport SPE 3/UP/5
Juin 1988

Environment CANADA Environnement
2039103B VOL 3UP ISS 5 880600
EXC # 001
TD 182 R46
RAPPORT (CANADA. ENVIRONNEMENT CANADA)
OOFF



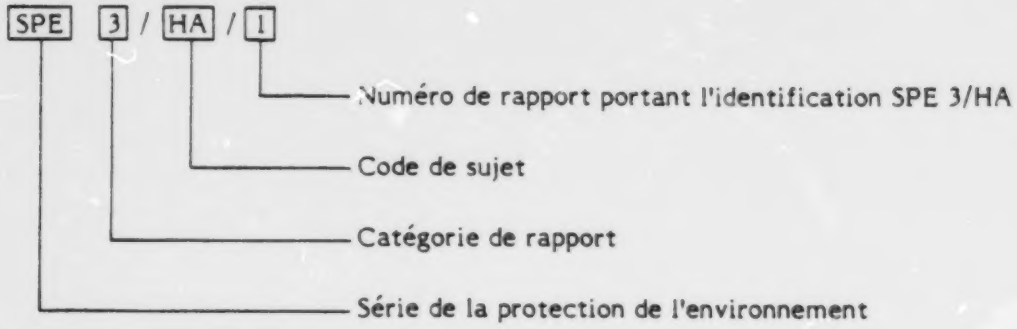
Environnement Canada Environment Canada

Canada

88-06240/

SÉRIE DE RAPPORTS DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Exemple de numérotage:



Catégories

1	Règlements/Lignes directrices/ Codes de procédure
2	Consultation publique: évaluation des problèmes, options de contrôle
3	Recherche et développement technologique
4	Revues de la documentation
5	Relevés
6	Évaluations des impacts sur l'environnement
7	Surveillance
8	Propositions, analyses et énoncés de principes généraux
9	Guides

Sujets

AG	Agriculture
AN	Technologie anaérobie
AP	Polluants atmosphériques
AT	Toxicité aquatique
CC	Produits chimiques commerciaux
CE	Consommateurs et l'environnement
CI	Industries chimiques
FA	Activités fédérales
FP	Traitement des aliments
HA	Déchets dangereux
IC	Chimie inorganique
MA	Pollution marine
MM	Exploitation minière et traitement des minéraux
NR	Régions du Nord et rurales
PF	Papier et fibres
PG	Production de l'électricité
PN	Pétrole et gaz naturel
SF	Traitement de surface
SP	Déversements de pétrole et de produits chimiques
SRM	Méthode de référence normalisée
TS	Systèmes de transport
UP	Pollution urbaine
WP	Protection/préservation du bois

Sujets et codes additionels sont introduits au besoin. Une liste de rapports du SPE peut être obtenue en s'adressant aux Publications de la protection de l'environnement, Conservation et Protection, Environnement Canada, Ottawa (Ontario) K1A 0H3.

LE PROGRAMME NATIONAL D'ESSAIS ET D'ÉVALUATION DES INCINÉRATEURS: ÉVALUATION DES ÉMISSIONS À L'INCINÉRATEUR DE DÉCHETS NON CONDITIONNÉS DE LA VILLE DE QUÉBEC

Sommaire des données et résultats

Protection de l'environnement
Conservation et Protection
Environnement Canada

Rapport SPE 3/UP/5
Juin 1988

COMMENTAIRES

Les lecteurs qui désirent faire des commentaires sur le présent rapport sont priés de s'adresser à:

R. Klicius ou A. Finkelstein
Direction des programmes industriels
Protection de l'environnement
Conservation et Protection
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0H3

Édition française de
National Incinerator Testing and Evaluation Program: Environmental Characterization of Mass Burning Incinerator Technology at Quebec City

préparée par le Module d'édition française
Conservation et Protection
Environnement Canada

English copy available from
Environmental Protection Publications
Conservation and Protection
Environment Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0H3

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1988
N° de cat. En 48-8/3-5F
ISBN 0-662-95075-5
IMPRIMERIE BEAUREGARD LIMITÉE

AVIS

Le présent rapport a été examiné par la Protection de l'environnement, Conservation et Protection, et approuvé pour publication. Cette approbation ne signifie pas nécessairement qu'il reflète les opinions et les politiques d'Environnement Canada. Toute mention de marques de commerce ou de produits commerciaux ne constitue en aucun cas une recommandation ou une approbation de leur utilisation.

RÉSUMÉ

L'incinération des déchets non conditionnés est la deuxième des trois technologies d'incinération à faire l'objet du Programme national d'essais et d'évaluation des incinérateurs d'Environnement Canada. Le principal objectif du Programme est de déterminer quel modèle d'incinérateur et quelles conditions de fonctionnement permettent de réduire le plus les émissions de polluants. L'installation étudiée se trouve à Québec; elle a été construite en 1974. Pour les essais, on a modifié l'un des fours d'incinération pour le moderniser, opération qui a coûté plus de deux millions de dollars.

Le nouveau four a fait l'objet d'une évaluation de 3 mois. D'après les résultats des 19 essais de caractérisation, on a retenu 5 conditions pour des essais plus poussés; on a pu réaliser 13 essais de performance avec succès. Pour tous les essais, on a pesé, échantillonné et analysé les déchets et les cendres. Par ailleurs, un réseau informatique étendu a permis de surveiller en temps réel les grandes variables de fonctionnement telles que le rythme d'enfournement des ordures, les températures dans la chambre de rayonnement, la distribution de l'air, ainsi que les autres paramètres du processus. Les gaz rejetés, les résidus de la combustion et les cendres volantes ont fait l'objet d'une série d'analyses, notamment le dosage des dioxines, furannes, biphényles polychlorés, chlorophénols, chlorobenzènes, hydrocarbures aromatiques polycycliques, gaz acides et de plus de 30 métaux lourds.

Lorsque les conditions de fonctionnement étaient bonnes, les émissions de dioxines du four modifié étaient de 40 à 100 fois moins élevées que celles de l'installation originale, les teneurs variant de 10 à 100 ng/m^3N. Même lorsque les conditions de fonctionnement n'étaient pas favorables, les émissions de dioxines étaient malgré tout dix fois moindres que les teneurs enregistrées avant que le four soit modifié (elles se chiffraient à 200 - 300 ng/m^3N). Les émissions de particules avaient diminué dans une mesure comparable.

Les analyses de régression à variables multiples ont révélé des corrélations significatives entre les émissions de certains composés organiques en traces (p. ex. les dioxines) et divers paramètres de fonctionnement comme le débit d'air de combustion, le rapport admission d'air sous les grilles et au-dessus de la zone de combustion et enfin, le rythme d'enfournement. On a pensé se servir de ces paramètres pour régulariser l'incinération afin de limiter les émissions de composés organiques en traces.

On a également observé des corrélations marquées entre les émissions de composés organiques en traces et divers paramètres faciles à surveiller comme la teneur

en monoxyde de carbone, l'excès d'oxygène, la teneur en oxydes d'azote et la température du four: on pourrait s'en servir pour déceler la formation de quantités importantes de composés organiques en traces, et donc d'en limiter les émissions.

ABSTRACT

The environmental characterization of mass burning incinerator technology is the second of three incinerator technologies being tested under Environment Canada's National Incinerator Testing and Evaluation Program. The main objective of this program is to define the optimum design and operating conditions to minimize emissions of concern. The facility tested is located in Quebec City, and was built in 1974. For the testing program, one of the incinerator furnaces was modified to a "state-of-the-art" unit at a cost exceeding two million dollars.

The new furnace design was evaluated during a three-month period. Based on 19 characterization tests, five performance conditions were selected for extensive testing and 13 performance tests were successfully completed. All incoming wastes and ash residues were weighed, sampled and analyzed. Key incinerator operating variables, such as refuse feed rate, furnace radiation chamber temperatures, undergrate/overfire air distribution and other process parameters, were monitored by an extensive computer network system on a "real time" basis. A wide range of analyses was carried out on exhaust gas emissions and all the ash discharges, including analyses for dioxins, furans, polychlorinated biphenyls, chlorophenols, chlorobenzenes, polycyclic aromatic hydrocarbons, over 30 heavy metals, and acid gases.

Under good operating conditions, dioxin emissions from the modified furnace were 40 et 100 times lower than the original facility, achieving concentrations of 10 to 100 ng/Nm^3. Even under poor operating conditions, dioxins from the new furnace were an order of magnitude lower (i.e., 200 - 300 ng/Nm^3). A similar decrease in particulate emissions was observed.

Significant multi-variate correlations were found between a number of trace organic emissions (e.g., dioxins), and operating variables such as combustion air flow rates, underfire/overfire ratio, and refuse feed rates. These variables were identified as potential control parameters which could be used to control incinerator operating conditions to ensure minimal trace organic emissions.

In addition, strong multi-variate correlations were identified between trace organic emissions and easily monitored variables such as carbon monoxide, excess oxygen, nitrogen oxides, and furnace temperature, which could be employed as early warning signals of high trace organic emissions.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ		iii
ABSTRACT		iv
LISTE DES FIGURES		ix
LISTE DES TABLEAUX		xi
REMERCIEMENTS		xiii
1	INTRODUCTION	1
2	DESCRIPTION DE L'USINE D'INCINÉRATION	4
2.1	Généralités	4
2.2	Composants et structure de l'installation	4
2.3	Fonctionnement général	7
2.4	Modernisation	8
2.4.1	Modélisation de l'écoulement de l'air dans le four	8
2.4.2	Modifications finales	11
3	DESCRIPTION DU PROGRAMME	14
3.1	Stratégie	14
3.2	Travail préparatoire	14
3.3	Essais de caractérisation	16
3.4	Essais de performance	21
4	PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ANALYSE	24
4.1	Généralités	24
4.2	Ordures	24
4.2.1	Échantillonnage	24
4.2.2	Rythme d'enfournement	24
4.3	Échantillonnage des cendres	25
4.4	Échantillonnage des gaz de carneau	27
4.4.1	Dosage en continu	27
4.4.2	Échantillonnage manuel	27
4.5	Méthodes d'analyse	27
4.5.1	Métaux	28
4.5.2	Composés organiques	28
4.5.3	Divers	29
4.5.4	Lixiviation	29
4.6	Assurance et contrôle de la qualité	29
5	RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERFORMANCE	32
5.1	Comparaison des données des essais d'un même groupe	32
5.2	Conditions de fonctionnement	33
5.2.1	Bonnes conditions de fonctionnement au taux nominal de production de vapeur	33
5.2.2	Conditions de fonctionnement médiocres au taux nominal de production de vapeur	33
5.2.3	Production de vapeur faible et élevée	42
5.3	Données continues sur les gaz	42
5.4	Émissions de composés organiques en traces	44
5.4.1	Dioxines et furannes	45

5.4.2	Autres composés organiques en traces	46
5.5	Émissions de particules et de métaux	49
5.6	Analyse des ordures	51
5.7	Rendement thermique	54
5.8	Stratification des températures dans la chambre de rayonnement	54
5.9	Analyse des cendres	56
5.9.1	Composés organiques en traces	56
5.9.2	Métaux	56
5.10	Classification des matières plastiques	56
5.11	Apports et rejets de métaux et de composés organiques	58
5.11.1	Métaux	58
5.11.2	Composés organiques en traces	58
6	RAPPORT ENTRE LES ÉMISSIONS ET LES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT	61
6.1	Méthodologie de l'analyse statistique	61
6.2	Stratégie de l'analyse des données	63
6.2.1	Variables dépendantes	63
6.2.2	Variables indépendantes	63
6.3	Corrélations et analyse de régression linéaire simple	64
6.3.1	Dioxines	64
6.3.2	Furannes	68
6.3.3	Particules	70
6.3.4	Métaux	71
6.3.5	Monoxyde de carbone	72
6.4	Analyse de régression linéaire multiple - émissions de composés organiques	72
6.4.1	Généralités	72
6.4.2	Dioxines	76
6.4.3	Furannes	79
6.4.4	Chlorophénols et chlorobenzènes	79
6.4.5	Hydrocarbures aromatiques polycycliques et biphényles polychlorés	79
7	CARACTÉRISATION DES CENDRES	84
7.1	Extractabilité des composés organiques	84
7.2	Extractabilité des métaux	86
8	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	92
8.1	Essais de performance	92
8.1.1	Programme d'essais	92
8.1.2	Régression simple	93
8.1.3	Régression multiple	95
8.2	Combustion et fonctionnement	97
8.3	Recommandations	98
RÉFÉRENCES		100
ANNEXE	Symboles, abréviations et homologues des DDPC et des DFPC	103
DÉFINITIONS		109

LISTE DES FIGURES

2.1	Coupe schématique d'une unité d'incinération de la CUQ	5
2.2	Détail d'un four d'incinération tel que modifié en 1978	6
2.3	Détail d'un four d'incinération tel que modifié en 1986	10
2.4	Four d'incinération - Modifications touchant la combustion	12
3.1	Points d'échantillonnage pour les essais	15
3.2	Paramètres retenus pour les essais de caractérisation	17
3.3	Conditions de fonctionnement durant les essais de caractérisation	19
3.4	Conditions de fonctionnement durant les essais de performance	21
3.5	Paramètres étudiés lors des essais de performance	23
4.1	Montages d'échantillonnage	26
5.1	Conditions de fonctionnement lors des essais de performance	32
5.2	Résumé des essais de performance EP02/10/11 - Bonnes conditions de fonctionnement, rythme d'enfournement lent	36
5.3	Résumé des essais de performance EP05/06/12 - Bonnes conditions de fonctionnement, rythme d'enfournement nominal	37
5.4	Résumé des essais de performance EP07/09 - Bonnes conditions de fonctionnement, rythme d'enfournement rapide	38
5.5	Résumé des essais de performance EP03/04 - Conditions de fonctionnement médiocres, rythme d'enfournement nominal, basse température	39
5.6	Résumé des essais de performance EP14/15 - Conditions de fonctionnement médiocres, rythme d'enfournement nominal, mauvaise distribution de l'air	40
5.7	Comparaison des émissions de dioxines	45
5.8	Répartition des homologues des dioxines et des furannes	48
5.9	Comparaison des émissions de particules	51
5.10	Échantillonnage multiple des ordures au cours de l'essai de performance EP14	52
5.11	Distribution de la température dans la chambre de rayonnement (EC01)	55
5.12	Distribution de la température à l'entrée de la chaudière (EC01)	55
5.13	Apports/rejets de dioxines et de furannes (moyenne pour tous les essais)	60
5.14	Apports/rejets de chlorobenzènes, de chlorophénols et de biphényles polychlorés (moyennes pour tous les essais)	60
6.1	Corrélation entre les teneurs en dioxines et le débit d'air primaire	65

6.2	Corrélation entre les teneurs en dioxines et la température dans le bas de la chambre de rayonnement	66
6.3	Corrélation entre les teneurs en dioxines et la teneur en monoxyde de carbone	67
6.4	Corrélation entre les teneurs en furannes et le débit d'air primaire	69
6.5	Corrélation entre les teneurs en furannes et la température dans le bas de la chambre de rayonnement	69
6.6	Corrélation entre les teneurs en composés organiques en traces et la teneur en monoxyde de carbone	73
6.7	Corrélations trouvées pour les dioxines	77
6.8	Corrélations trouvées pour les furannes	80
7.1	Teneurs moyennes des cendres en métaux lourds	87
7.2	Moyennes cumulatives des MSD libérées à l'extraction par lots séquentiels multiples	89
7.3	Effets du pH sur la solubilité du cadmium et du zinc présents dans les cendres volantes captées par l'électrofiltre	89
7.4	Résultats des essais d'extraction chimique séquentielle pour identifier les fractions extractibles à long terme	90

LISTE DES TABLEAUX

4.1	Méthodes d'échantillonnage manuel des effluents gazeux	28
4.2	Sommaire des méthodes d'analyse	30
5.1	Données sur les principaux paramètres de fonctionnement ajustés pour les essais de performance (regroupées par conditions de fonctionnement)	34
5.2	Principales données recueillies lors des essais de performance (regroupées par conditions de fonctionnement)	35
5.3	Principaux paramètres ajustés pour les essais de performance	41
5.4	Résultats de l'analyse en continu des gaz lors des essais de performance (moyenne de groupe)	43
5.5	Émissions de composés organiques en traces lors des essais de performance	44
5.6	Teneurs des émissions en homologues des dioxines et des furannes lors des essais de performance	47
5.7	Émissions de particules et de métaux lors des essais de performance (moyenne de groupe)	50
5.8	Teneurs en composés organiques en traces des sous-échantillons d'ordures (essai de performance EP14)	53
5.9	Composés organiques en traces présents dans les cendres, selon le mode de fonctionnement - Essais de performance	57
5.10	Métaux d'intérêt prioritaire présents dans les cendres, selon le mode de fonctionnement - Essais de performance	57
5.11	Apports et rejets de métaux	59
6.1	Caractère significatif des données de corrélation expérimentale	62
6.2	Corrélations entre les teneurs en dioxines et les variables de fonctionnement	65
6.3	Corrélations entre les teneurs en dioxines et les variables de surveillance	67
6.4	Corrélations entre les teneurs en furannes et les variables de fonctionnement	68
6.5	Corrélations entre les teneurs en furannes et les variables de surveillance	70
6.6	Coefficients de détermination (r^2) pour les émissions de métaux vs les composés organiques en traces	71
6.7	Résumé des coefficients de détermination pour les modèles de régression	74
6.8	Analyse de régression multiple pour les modèles relatifs aux dioxines	78
6.9	Analyse de régression multiple pour les modèles relatifs aux furannes	81

7.1	Teneurs moyennes en composés organiques en traces présents dans les échantillons de cendres prélevés pour les essais d'extraction	85
7.2	Teneurs moyennes en composés organiques en traces de la solution d'extraction	85
7.3	Résumé des essais d'extraction	88
7.4	Résultats des essais d'extraction (Règlement 309 de l'Ontario) sur les cendres volantes provenant de la chaudière, de l'économiseur et de l'électrofiltre	90

REMERCIEMENTS

Nous aimerions exprimer ici notre reconnaissance à tous ceux qui ont participé à l'étude de l'incinérateur de la Communauté urbaine de Québec. Il s'agissait d'essais que la Lavalin Inc. s'est chargée de réaliser dans le cadre du Programme national d'essais et d'évaluation des incinérateurs (PNEEI) d'Environnement Canada. Nous aimerions tout particulièrement remercier M. Hervé Aubin, directeur des services techniques de la Communauté urbaine de Québec, et la Montenay Inc., exploitant de l'incinérateur, pour l'esprit de collaboration dont ils ont fait preuve et l'aide qu'ils nous ont apportée. Plus de 35 ingénieurs, chimistes et techniciens ont directement travaillé aux essais et un personnel nombreux s'est occupé des analyses en laboratoire. Ce projet n'aurait pu être mené à bien n'eût été cet effort collectif. Il est évidemment impossible de remercier individuellement chaque personne qui a contribué d'une manière ou d'une autre au succès des travaux. Nous tenons néanmoins à souligner le travail accompli par:

Principal entrepreneur:	- Lavalin Inc.
Entrepreneurs en sous-traitance:	- Roche - Envirobec - La Fondation de recherches de l'Ontario - Zenon Environmental Inc. - Diagnostic Research Laboratories - Shred-Pax Limited
Administrations:	- Communauté urbaine de Québec (CUQ) - Ministère de l'Environnement du Québec (MENVQ) - Ministère de l'Environnement de l'Ontario (MEO) - Environnement Canada (EC) - Division des activités urbaines (DAU) - Division de la mesure de la pollution (DMP) - Division des services d'analyse (DSA) - Centre technique des eaux usées (CTEU)

Environnement Canada et Énergie, Mines et Ressources Canada (groupe d'étude fédéral de la R & D sur l'énergie) ont financé ce projet. De plus, le ministère de l'Environnement de l'Ontario a assumé la plus grande partie des coûts d'un programme d'assurance et de contrôle de la qualité indépendant, tandis qu'Environnement Québec a fourni des services d'échantillonnage et du matériel.

Jean-Yves Urbain
Directeur de projet
Lavalin Inc.

Abe Finkelstein
Responsable scientifique
Protection de l'environnement
Conservation et Protection
Environnement Canada

1 INTRODUCTION

Comme il devient difficile de trouver des emplacements propices à l'enfouissement des déchets et que leur élimination coûte de plus en plus cher, bon nombre de municipalités au Canada sont obligées de considérer d'autres méthodes. La valorisation énergétique des déchets dans des installations d'incinération a particulièrement retenu l'attention, tant du public que des administrateurs. Cette méthode présente deux grands avantages: forte réduction du volume des déchets à éliminer et production d'énergie pouvant générer des revenus. La réduction en volume peut atteindre 90 p. 100, ce qui prolonge la durée d'utilisation des décharges actuellement en usage et, par conséquent, réduit la nécessité d'en ouvrir de nouvelles. En outre, la valorisation énergétique des ordures peut être rentable pour l'exploitant de l'installation d'incinération et elle réduit les besoins en combustibles importés.

La valorisation énergétique dans des installations d'incinération, qu'elles soient de conception ancienne ou récente, a été régulièrement remise en question en raison des effets des émissions sur la santé et sur l'environnement. À ces inquiétudes sont venues s'ajouter les préoccupations du Comité consultatif d'experts sur les dioxines (ministres de Santé et Bien-être social Canada et d'Environnement Canada) qui reconnaissait que l'incinération des ordures est une *source* importante d'émissions de dioxines *que l'on peut contrôler* (1). Un plan d'action fut donc établi.

Ce plan d'action retenait deux recommandations clés du Comité: *1)* Intensifier les efforts afin de définir les critères de conception des incinérateurs et les conditions d'opération optimales pour les installations municipales et industrielles, en vue de limiter le plus possible la production de dioxines et l'émission de ces composés dans l'atmosphère. *2)* Identifier quelles étaient les meilleures techniques d'incinération utilisées au Canada sur la base des effets sur l'environnement. Pour cela, Environnement Canada a créé le Programme national d'essais et d'évaluation des incinérateurs (PNEEI). Suivant un échéancier détaillé s'étalant sur cinq ans, ce programme consiste à examiner trois types d'incinérateurs les plus utilisés, à évaluer les nouvelles techniques antipollution et à étudier les nouveaux incinérateurs. On cherche aussi à voir s'il y a une corrélation entre les conditions de combustion et la production de composés organiques (dioxines, furannes, etc.) et inorganiques (métaux et gaz acides) en traces. On a fait de nombreux travaux pour trouver le meilleur "créneau d'exploitation", c'est-à-dire le maintien de conditions de combustion optimales alors que l'émission de produits jugés nuisibles est limitée le plus possible, voire supprimée.

Dans la première partie du PNEEI, on a formulé les critères de sélection des installations à valorisation énergétique jugées appropriées pour les essais et l'évaluation. Sur la base de ces critères, trois types d'incinérateurs d'usage répandu et illustrant l'orientation des techniques d'incinération au Canada ont été retenus. Il s'agit des incinérateurs suivants:

- Un incinérateur à combustion en deux étapes (installation modulaire).
- Un incinérateur de déchets non conditionnés à grilles mobiles.
- Un incinérateur à combustion en semi-suspension de combustibles dérivés des déchets.

L'incinérateur à combustion en deux étapes de Parkdale, à l'Île-du-Prince-Édouard, est la première installation qu'on a étudiée. L'étude s'est achevée de façon concluante au début de 1985 et un rapport sommaire est paru en septembre de la même année (2).

L'incinérateur de déchets non conditionnés de la Communauté urbaine de Québec (CUQ) qu'exploite la Montenay Inc. était la deuxième installation retenue et fait l'objet du présent rapport.

La troisième installation sera celle de la Mid Connecticut Resource Recovery Project à Hartford (Connecticut), qui brûle des combustibles dérivés des déchets. Elle a été conçue et construite par la Combustion Engineering Inc.; elle est exploitée par la Mid Connecticut Resource Recovery Authority. Les essais commenceront cet été.

Le programme d'évaluation de l'installation de la CUQ a nécessité la cueillette d'une foule de données sur le processus d'incinération et les émissions pour une gamme de conditions de fonctionnement. Une campagne de mesures du même genre avait été faite aux installations de Parkdale, à l'Île-du-Prince-Édouard. Comme l'installation de la CUQ a été conçue il y a plus de dix ans, on ne l'a pas jugée comparable aux installations modernes d'incinération de déchets non conditionnés; on a donc ajouté au programme une étude de modernisation afin de voir quelles modifications devaient être apportées pour la rendre conforme aux progrès accomplis.

On a amassé une quantité considérable de données lors de l'évaluation de cette installation. Ces données, et les conclusions tirées de l'analyse, sont présentées en six volumes:

Volume I - Rapport sommaire, dans lequel on présente tous les résultats et conclusions importants.

Volume II - Rapport principal, dans lequel on donne une description complète du programme et une analyse détaillée des résultats. On présente aussi un

condensé des données recueillies en conditions réelles et en laboratoire durant les essais de caractérisation et de performance.

Volume III - Méthodologie, c'est-à-dire description complète de toutes les méthodes employées. On traite aussi des modifications apportées aux méthodes de référence standard et des raisons qui les ont motivées.

Volume IV - Rapport détaillé, dans lequel on résume toutes les données recueillies en fonction des divers modes de fonctionnement étudiés et des essais réalisés; on donne aussi les résultats des analyses au complet.

Volume V - Rapport d'analyse et de contrôle de la qualité (réalisé par un groupe indépendant), dans lequel on donne une évaluation indépendante et impartiale des méthodes d'échantillonnage et d'analyse.

Volume VI - Rapport des tests de lixiviation à court et à long terme des composés organiques et inorganiques présents dans les cendres.

Seul le Volume I fait l'objet d'un rapport officiel; les autres se présentent sur microfiches (nombre limité); on peut se les procurer à la Direction des programmes industriels.

2 DESCRIPTION DE L'USINE D'INCINÉRATION

2.1 Généralités

L'usine d'incinération municipale de Québec est la propriété de la Communauté urbaine de Québec (CUQ); elle se trouve dans le secteur sud de la ville de Québec. On y incinère des ordures ménagères et des déchets d'établissements commerciaux ainsi que des déchets solides industriels assimilables aux ordures recueillis par la CUQ, plusieurs autres municipalités et des entreprises privées. Sa capacité journalière est de 900 tonnes. Le procédé d'incinération, avec grilles mobiles et écrans d'eau, permet de brûler les déchets sans prétraitement, c'est-à-dire non conditionnés. Les gaz passent dans des chaudières de récupération de la chaleur pour produire de la vapeur surchauffée. Les cendres sont évacuées par un transporteur vers une décharge contrôlée désignée.

La Montenay Inc. exploite l'usine en vertu d'un contrat qui lui donne un contrôle étendu, notamment celui de toutes les opérations d'entretien et de réparation. Toute la vapeur produite est vendue à la Reed Paper Ltée; elle est fournie à un débit relativement constant et entre certaines limites de pression. L'incinérateur fonctionne 24 heures par jour, 363 jours par année; les opérations sont suspendues pendant 24 h deux fois par année afin de procéder à une inspection générale et à l'entretien de l'installation de production de vapeur et de la conduite d'alimentation qui relie l'usine à la papeterie Reed. L'installation comporte quatre fours indépendants; normalement, trois seulement fonctionnent simultanément.

Le Groupe SNC a dirigé la conception d'origine et la construction de l'usine, qui a été bâtie en 1974; la Dominion Bridge-Selzer Inc. a fourni l'équipement principal, et a construit les fours d'incinération conçus par la Von Roll Inc. En 1978, on a installé une voûte à écran d'eau au-dessus des grilles de séchage et de combustion de chaque four. La CUQ avait confié ces travaux à la Shawinigan-Lavalin Inc. et la Dominion Bridge-Selzer Inc. L'unité n° 4 a été modifiée par la firme Lavalin Inc. en 1985-1986 avant les essais conduits dans le cadre du PNEEI.

2.2 Composants et structure de l'installation

À la figure 2.1, on peut voir les principaux composants de cette installation:

i) installation de pesée des bennes à l'arrivée (pas illustrée dans la figure 2.1);

ii) enceinte de réception des ordures à porte unique comprenant un silo, une chute inclinée et un pont roulant;

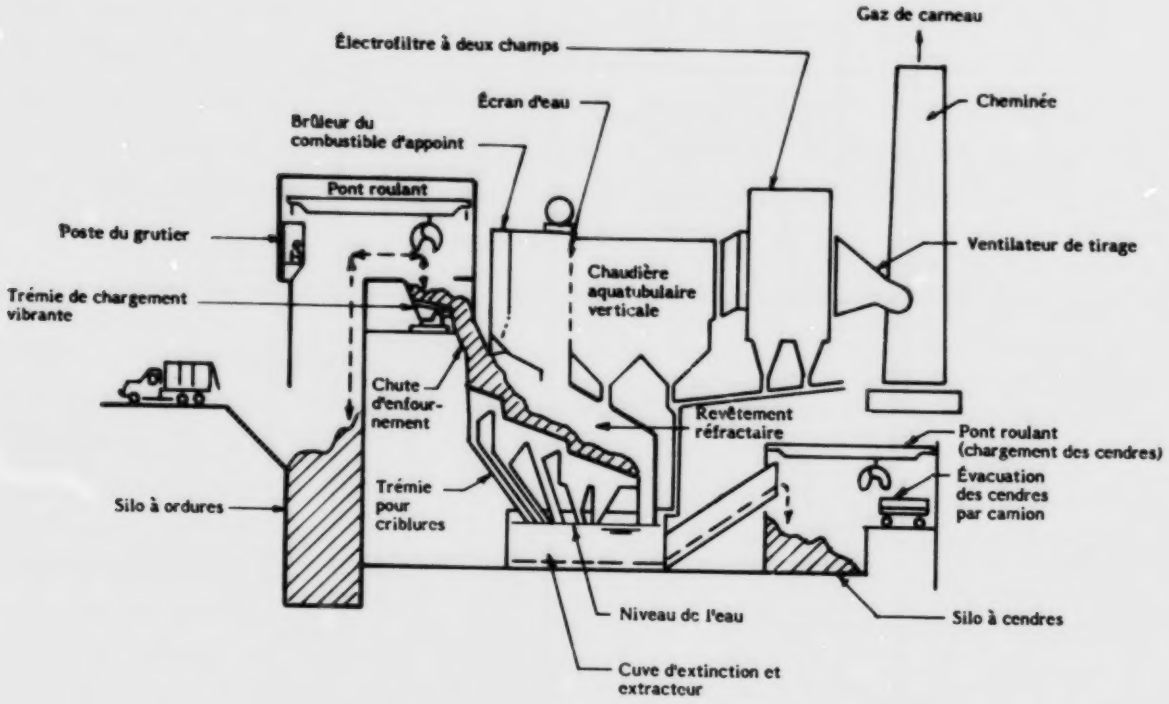


FIGURE 2.1 COUPE SCHÉMATIQUE D'UNE UNITÉ D'INCINÉRATION DE LA CUQ

iii) quatre fours d'incinération de déchets non conditionnés, débit nominal: 227 tonnes par jour;

iv) cuve d'extinction des cendres avec extracteur à chaîne, silo à cendres et pont roulant;

v) cheminée commune d'évacuation des gaz de carneau (environ 55 m de hauteur).

La figure 2.2 montre le détail d'un four d'incinération:

i) trémie de chargement vibrante;

ii) chute d'enfournement refroidie à l'eau;

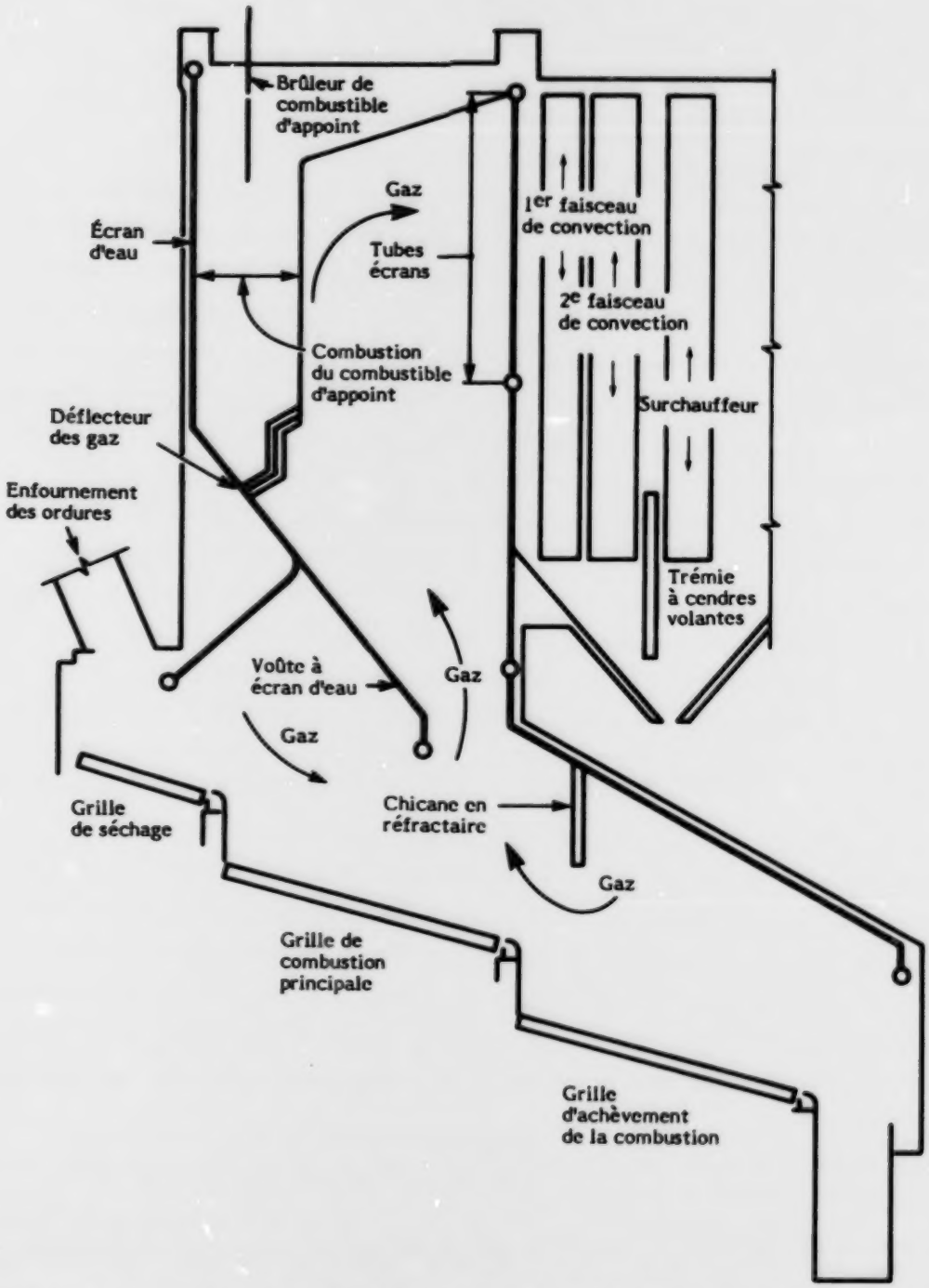


FIGURE 2.2 DÉTAIL D'UN FOUR D'INCINÉRATION - INSTALLATIONS DE LA CUQ - TEL QUE MODIFIÉ EN 1978

iii) grilles de séchage, de combustion et de finition alternatives;

iv) dans le bas du four, une zone de combustion avec parois en réfractaire;

v) zone de combustion avec écran d'eau, dont une section est garnie de réfractaire;

vi) chaudière de récupération de chaleur à faisceaux tubulaires et dispositif de nettoyage mécanique à percussion, avec surchauffeur et économiseur.

Chaque four d'incinération est également équipé d'un électrofiltre à deux champs, d'un ventilateur de tirage et d'une cuve d'extinction des cendres avec extracteur.

2.3 Fonctionnement général

Les bennes sont pesées à leur arrivée, puis déchargent leur contenu dans le silo à ordures. Tous les articles qu'on juge impropres à l'incinération, par exemple les gros appareils, sont retirés du silo au moyen du pont roulant et envoyés selon le cas dans une décharge ou à la ferraille. Deux ponts roulants suspendus servent à transférer les ordures du silo aux trémies de chargement vibrantes, à dégager la chute de déchargement et à mélanger les déchets. De la trémie de chargement, les déchets sont acheminés jusqu'à la grille de séchage par une chute refroidie à l'eau, suivant le rythme de l'incinération. La trémie vibrante fonctionne de telle sorte que les déchets accumulés dans la chute bloquent automatiquement l'entrée d'air dans la zone de combustion.

Trois groupes de grilles mobiles forment la sole du four. Les déchets se déplacent dans le four sous l'action du mouvement alternatif des grilles. La première grille (de séchage) règle le débit auquel les déchets qui tombent de la chute sont acheminés sur la grille de combustion principale; les déchets partiellement brûlés passent ensuite sur la troisième grille, soit la grille d'achèvement de la combustion. Les cendres tombent de l'extrémité de la troisième grille dans la cuve d'extinction. Des béliers hydrauliques à vitesse réglable permettent d'actionner les grilles indépendamment l'une de l'autre. En conditions normales, on règle l'allure de chaque grille pour que le processus se déroule au rythme voulu et de manière à ce que chacune donne le meilleur rendement possible. Les grilles sont inclinées à 15° et disposées en gradins.

Les particules fines (ou criblures) qui passent entre les grilles sont recueillies dans des trémies dont le contenu se déverse dans la cuve d'extinction. Ces trémies servent aussi à insuffler l'air primaire dans le four à travers les grilles. Chaque trémie est pressurisée par le ventilateur d'air primaire. Des trémies, l'air est insufflé entre les barreaux des grilles, de sorte qu'il se distribue assez uniformément dans le lit de déchets et la zone de combustion sus-jacente. Cet air sert aussi à refroidir les grilles.

Dans la zone de combustion, les parois du four sont revêtues d'un réfractaire d'alumine. Le plafond et les parois de la partie supérieure du four (chambre de rayonnement) sont constitués de tubes d'eau jointifs dans lesquels circule l'eau de la chaudière; ces tubes ont une double fonction: refroidissement des gaz et récupération de la chaleur. Cet arrangement forme ce que l'on appelle l'écran d'eau. Dans le bas, cet écran est revêtu d'un matériau réfractaire qui protège les tubes de l'action directe des flammes. Le plafond et les sections de l'écran d'eau proches de l'entrée de la chaudière de récupération sont exposés aux gaz: on récupère ainsi plus de chaleur.

Les gaz pénètrent dans la chaudière de récupération de chaleur par des tubes écrans verticaux. La chaudière multitubulaire à tubes verticaux comporte deux faisceaux de convection, un surchauffeur et un économiseur qui sont nettoyés par un dispositif à percussion mécanique. À la sortie de la chaudière, la température des gaz est comprise entre environ 200 °C et 280 °C, selon les conditions de fonctionnement.

Les gaz refroidis qui sortent de la chaudière passent dans un électrofiltre à deux champs qui capte les particules, et sont évacués dans l'atmosphère par une cheminée sous l'action d'un ventilateur de tirage.

2.4 Modernisation

En janvier 1985, Environnement Canada a chargé la firme Lavalin Inc. de déterminer quels travaux seraient nécessaires pour moderniser l'installation de la CUQ et quel serait le coût d'un tel projet. S'appuyant sur les résultats de cette étude, la Communauté urbaine de Québec a décidé de modifier l'un des quatre fours de son installation.

2.4.1 Modélisation de l'écoulement de l'air dans le four. - Pour aider les ingénieurs à déterminer quelle forme doit avoir le four et comment l'air doit s'y écouler pour que l'incinération soit optimale, la NELS Inc. a réalisé une étude de modélisation de l'écoulement de l'air dans un four d'incinération pour MacLaren Plansearch Inc. (une filiale de Lavalin).

Dans cette étude, on visait essentiellement les objectifs suivants:

i) améliorer la turbulence dans la zone d'air secondaire (au-dessus de la zone de combustion) afin d'assurer un mélange intime de l'air de combustion et des gaz combustibles;

ii) voir ce qu'il adviendrait si l'on augmentait le temps de séjour des gaz dans le four, ce qu'on pourrait faire en supprimant la chambre du brûleur d'appoint pour augmenter le volume utile du four;

iii) voir comment la forme du four et le débit d'air secondaire influencent l'écoulement des gaz à l'entrée de la chaudière;

iv) optimiser l'emplacement et la taille des buses d'air secondaire et améliorer les buses pour obtenir un mélange intime;

v) déterminer la forme et l'emplacement des déflecteurs à installer (voir figure 2.3) pour réaliser *ii)* et *iii)*;

vi) étudier comment le rapport d'air secondaire avant et arrière influe sur les facteurs énumérés en *i)*, *ii)* et *iii)*.

On a fabriqué une maquette en plexiglass et en bois à l'échelle de 1/6, de telle façon qu'il soit possible d'ajouter ou d'enlever des cloisons afin d'étudier différentes configurations. En tout, on a fait 51 essais enregistrés pour étudier l'écoulement de l'air avec la configuration du four modifié en 1978 (figure 2.2) et diverses configurations proposées.

L'analyse des écoulements observés a conduit aux conclusions suivantes:

- Avec la configuration originale modifiée en 1978, la chambre de rayonnement, qui occupe la partie supérieure du four, n'est vraiment utilisée qu'à une fraction de sa capacité.
- Avec cette même configuration, une grande quantité de particules sont emportées depuis les grilles de combustion principale et d'achèvement de la combustion jusqu'au bas de l'entrée de la chaudière, car l'ouverture de la voûte radiante est étroite, ce qui a pour effet d'accélérer les mouvements ascendants.
- La vitesse d'écoulement des gaz à l'entrée de la chaudière expliquerait l'usure excessive du bas des tubes écrans à cet endroit.
- Le temps de séjour des gaz dans la chambre de rayonnement est limité à cause de la vitesse excessive des gaz et de la présence du brûleur de combustible d'appoint.
- Il est probable que les flammes ont atteint les tubes écrans de la chaudière.

Pour corriger ces défauts, on a décidé de modifier la forme du four suivant le plan présenté à la figure 2.3. On a proposé d'installer un déflecteur inférieur comme dans les derniers modèles de Von Roll, de façon que la réflexion du rayonnement sur les grilles de combustion principale et d'achèvement de la combustion soit maximale et que la qualité des cendres s'améliore. On voulait aussi "refouler" les gaz de la grille d'achèvement de la combustion afin que tous les composés volatils soient brûlés. On a fait l'essai de diverses formes de déflecteurs inférieurs afin de trouver l'arrangement optimal.

On a proposé l'installation d'un déflecteur supérieur pour les raisons suivantes:

- Limiter la formation de tourbillons de gaz dans la chambre supérieure.

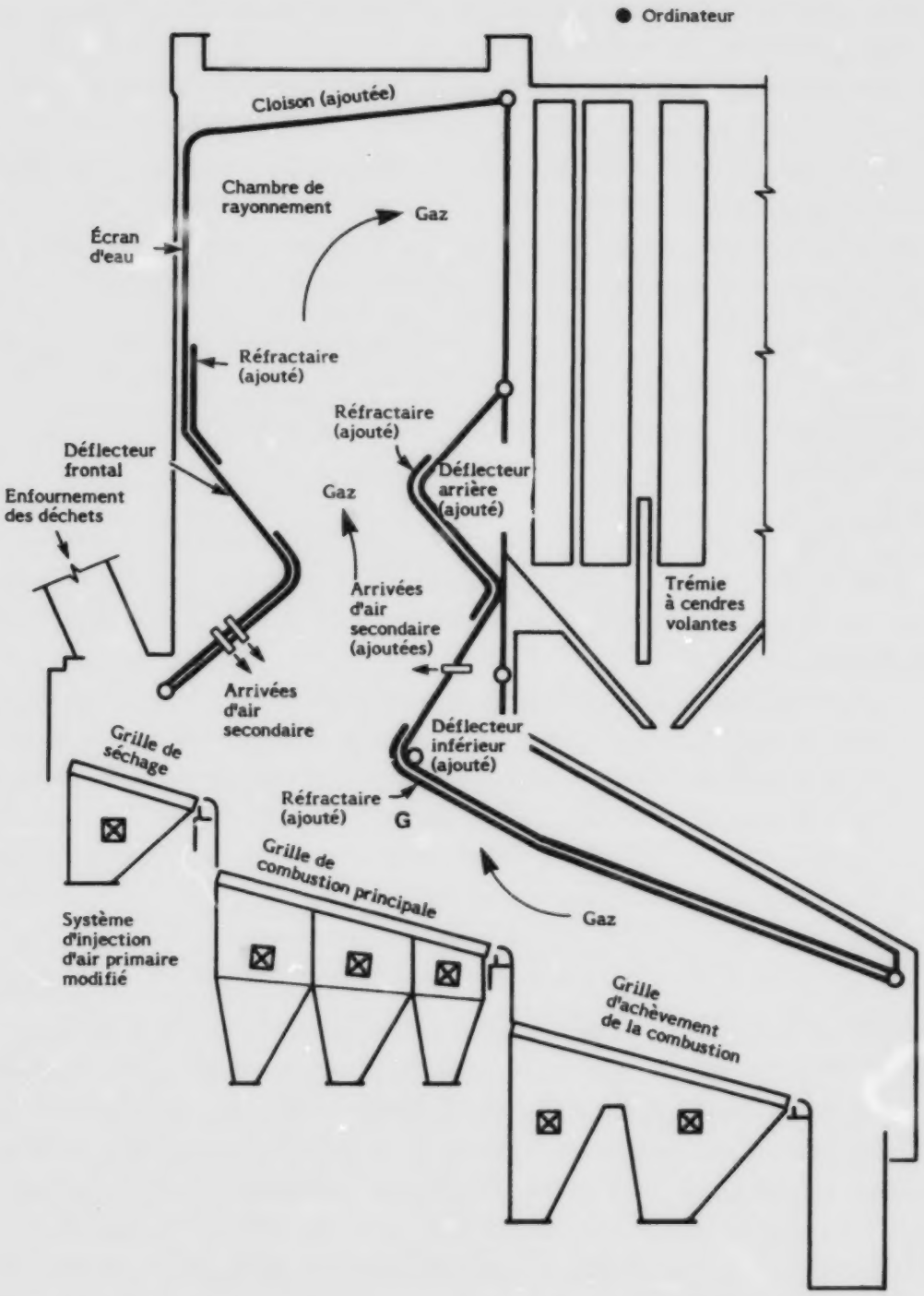


FIGURE 2.3 DÉTAIL D'UN FOUR D'INCINÉRATION - INSTALLATIONS DE LA CUQ - TEL QUE MODIFIÉ EN 1986

- Améliorer la distribution des gaz dans la chambre de rayonnement.
- Limiter la stratification des gaz de combustion à l'entrée de la chaudière.

Bref, la modélisation de l'écoulement a permis de confirmer qu'avec les modifications proposées, le mélange air/gaz combustibles se ferait bien et qu'il y aurait une zone de forte turbulence au-dessus des entrées d'air surplombant la zone de combustion, que le temps de séjour des gaz augmenterait et que la distribution des gaz à l'entrée de la chaudière serait améliorée.

2.4.2 Modifications finales. - En s'appuyant sur les résultats de l'étude de modélisation présentée ci-haut, on a apporté en mars 1986 les modifications suivantes à l'unité n° 4:

i) **Modification de la chambre de rayonnement.** - On a réalisé un arrangement avec déflecteur et enlevé la voûte à écran d'eau afin que les gaz n'atteignent plus des vitesses excessives, que l'air secondaire (au-dessus de la zone de combustion) se mélange intimement aux gaz dans le bas de la chambre et que la distribution des gaz dans la chaudière s'améliore. On a aussi enlevé le boîtier du brûleur d'appoint de sorte que le volume de la chambre de rayonnement s'est accru d'environ 32 p. 100; par conséquent, le temps de séjour des gaz a augmenté.

ii) **Modification du circuit de distribution d'air primaire.** - Pour améliorer la distribution et la régulation du débit d'air primaire, on a ajouté des trémies et créé des zones d'air sous les grilles; on a aussi installé des registres et des débitmètres pour que la répartition vers les grilles de l'air primaire injecté sous la zone de combustion soit automatiquement contrôlée. Comme on peut le voir à la figure 2.4, l'air primaire est maintenant réparti entre neuf zones. Les régulateurs de débit individuels dirigent dans chaque trémie un pourcentage préalablement fixé de la quantité totale d'air admise; le débit et la distribution de l'air primaire sont constamment ajustés.

iii) **Modifications apportées au circuit d'alimentation en air au-dessus de la zone de combustion.** - Les modifications apportées à ce circuit (voir la figure 2.3) visaient à injecter de l'air secondaire dans les gaz de combustion à partir du déflecteur avant et du déflecteur arrière au moyen de nouvelles buses multiples à convection forcée. Comme l'admission d'air par les buses avant et arrière doit être soigneusement réglée, on a installé dans chaque conduite un registre automatique qui peut fermer le circuit, ainsi qu'un régulateur de débit automatique (principalement commandé en fonction de la température des gaz de combustion à l'entrée de la chaudière). Dans

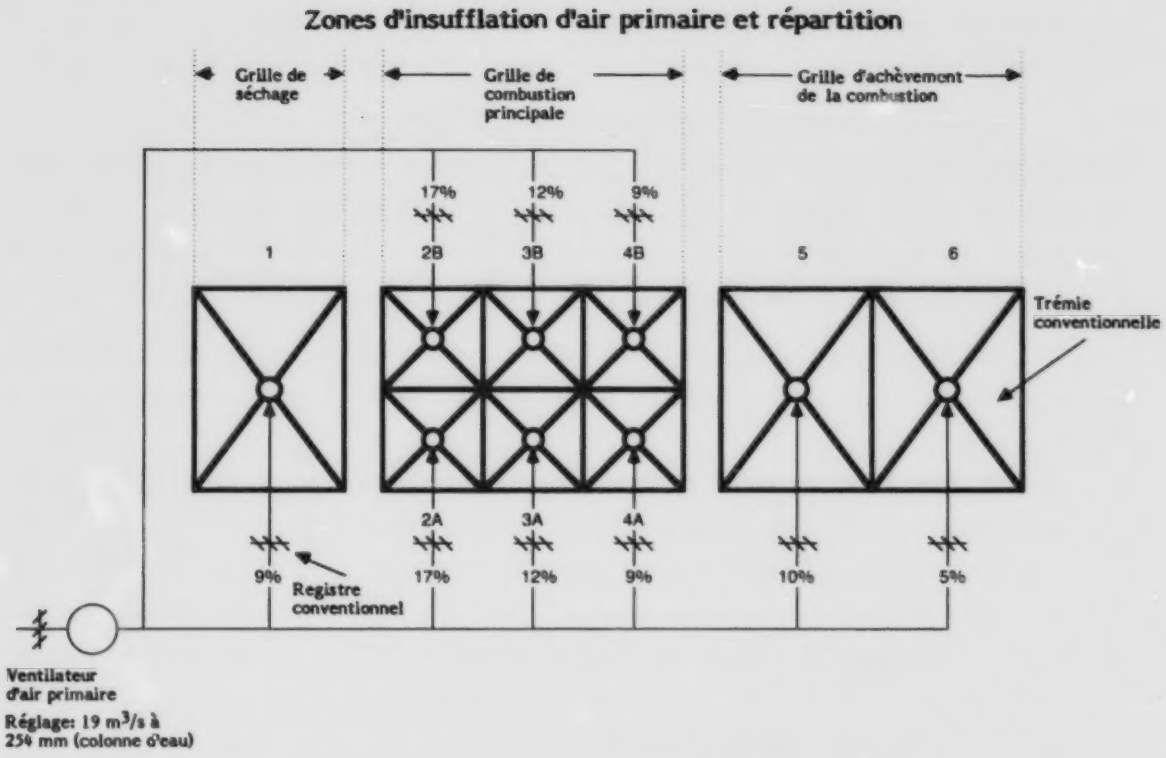


FIGURE 2.4 FOUR D'INCINÉRATION - INSTALLATIONS DE LA CUQ - MODIFICATIONS TOUCHANT LA COMBUSTION

l'installation modifiée, l'air secondaire est injecté dans le four par 10 buses placées dans le déflecteur avant et 9 dans le déflecteur arrière. Le circuit secondaire est alimenté en air ambiant par un ventilateur, à une pression de 500 mm (colonne d'eau). On a aussi conçu le circuit pour que le rapport entre l'admission d'air à l'avant et à l'arrière ou à l'arrière et à l'avant soit de 3/1 ou que le rapport entre l'admission d'air primaire et l'admission d'air secondaire soit de 65/35. On peut régler l'alimentation pour obtenir toute une gamme de rapports, ce qui permet de l'adapter à diverses conditions d'exploitation.

iv) **Modification des instruments et des dispositifs régulateurs.** - Pour moderniser les régulateurs automatiques de l'unité faisant l'objet des essais, on a fait d'importantes modifications:

- On a installé un ordinateur Bailey Network-90 qui fournit aux opérateurs des renseignements sur le processus et qui règle automatiquement les paramètres suivants:
  - débit de vapeur;
  - allure des grilles;
  - débit d'air primaire et distribution;
  - température à l'entrée de la chaudière;
  - teneur en oxygène des gaz de combustion;
  - débit d'air secondaire et distribution.
- On a modifié le régulateur hydraulique des grilles pour que leur mouvement de va-et-vient s'ajuste automatiquement au débit de vapeur de la chaudière.
- On a installé un régulateur d'excès d'air à rétroaction (contrôleur d'oxygène) qu'on a relié au régulateur ci-dessus.
- On a modifié le régulateur de débit d'air primaire de façon qu'il s'ajuste automatiquement à la valeur de consigne du débit de vapeur et(ou) à l'excès d'air (contrôleur d'oxygène).
- On a installé un régulateur de débit automatique dans le circuit de distribution d'air primaire afin que l'admission d'air dans chacune des trémies, y compris celles placées sous les grilles de séchage et d'achèvement de la combustion, soit conforme au pourcentage établi.
- On a ajouté un régulateur d'admission d'air secondaire qui ajuste automatiquement le débit et le rapport entre l'admission d'air à l'avant et à l'arrière en fonction de la température mesurée dans le haut de la chambre de rayonnement.

3 DESCRIPTION DU PROGRAMME

3.1 Stratégie

On a conçu le programme d'essais des installations d'incinération de la CUQ en fonction de deux grands objectifs du PNEEI:

1) Évaluer la performance d'un incinérateur de déchets non conditionnés moderne (manutention des déchets, combustion et récupération de la chaleur).
2) Caractériser les émissions dans différentes conditions d'exploitation (en mettant en parallèle les conditions d'exploitation, c.-à-d. rythme d'enfournement, conditions dans le four de combustion, avec les émissions de particules, métaux et composés organiques en traces).

On a revu les méthodes d'échantillonnage et les protocoles mis au point pour l'évaluation de l'incinérateur à combustion en deux étapes de l'Île-du-Prince-Édouard (2) pour voir s'il était possible de les reprendre tels quels ou s'il y avait lieu de les modifier. Les méthodes d'échantillonnage et protocoles d'analyse sont décrits au chapitre 4.

Dans le cadre d'un programme provincial de surveillance et de mesures, les émissions des installations d'incinération de la CUQ avaient déjà fait l'objet d'un grand nombre de contrôles (évaluation de l'acceptabilité, émissions annuelles de particules, granulométrie et mesure des teneurs en acide chlorhydrique, métaux, dioxines et furannes). Ces données constituaient la base de comparaison qu'il nous fallait pour évaluer l'impact des modifications apportées sur la combustion et les émissions.

3.2 Travail préparatoire

Avant de procéder aux essais de caractérisation, il a fallu décider de l'unité qui serait mise à l'essai et de l'emplacement des points d'échantillonnage, modifier et installer l'appareillage d'échantillonnage et mettre en place le système d'acquisition de données. Notre choix s'est arrêté sur l'unité n° 4 pour les raisons pratiques suivantes:

i) l'emplacement du point d'échantillonnage des gaz évacués convenait assez bien;
ii) l'espace libre permettait d'installer les appareils d'analyse en continu des gaz;
iii) l'espace libre à l'arrière du bâtiment principal était facile d'accès;
iv) les essais ne perturberaient pas trop le fonctionnement des autres fours d'incinération.

Les points d'échantillonnage sont indiqués sur la figure 3.1. Nous donnons ci-après les raisons qui ont justifié notre choix.

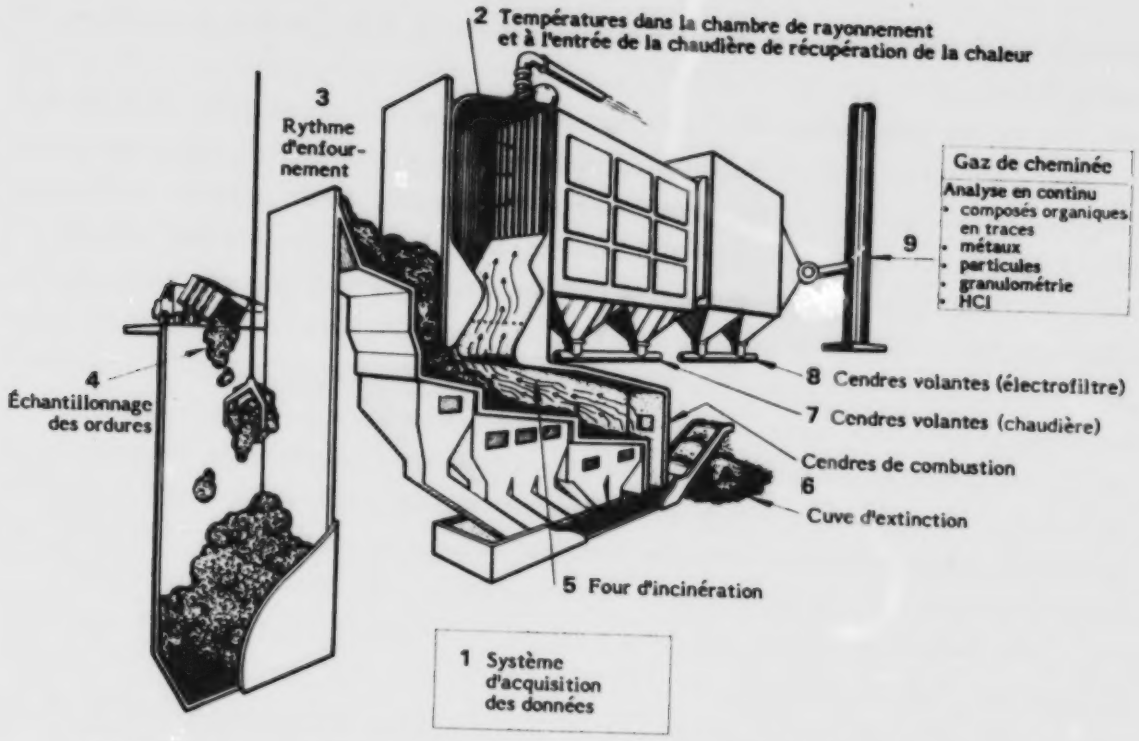


FIGURE 3.1 INSTALLATIONS D'INCINÉRATION DE LA CUQ - POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE POUR LES ESSAIS

Ordures. - On a prélevé au point nº 4 des échantillons représentatifs des chargements arrivant à l'incinérateur durant chaque essai pour déterminer la composition des ordures et leur pouvoir calorifique. On notait l'heure et le poids de chaque enfournement (point nº 3) afin d'être en mesure d'établir des bilans de matières.

Température dans la chambre de rayonnement. - Les zones de basses températures dans le four sont considérées comme l'une des causes de la formation de dioxines et de furannes et feraient obstacle à la destruction des composés organiques en traces. Pour les détecter, on a installé un réseau de thermocouples à l'horizontale dans la chambre de rayonnement, juste au-dessus de l'admission d'air surplombant la zone de combustion, et un autre, à la verticale, à l'entrée de la chaudière (point nº 2).

Cendres. - La qualité des cendres est souvent considérée comme l'un des meilleurs indicateurs de la bonne marche du processus d'incinération. Pour l'évaluer, on a prélevé des cendres directement sur la grille d'achèvement de la combustion par un orifice

pratiqué spécialement pour ces essais dans la porte arrière de la chambre de rayonnement (point nº 6).

Cuve d'extinction des cendres. - Pour déterminer la réduction en poids des ordures, il a fallu mesurer la quantité totale de cendres produites. Pour cela, nous avons dévié les cendres volantes de la chaudière et de l'économiseur ainsi que celles captées par l'électrofiltre, qui sont normalement acheminées dans la cuve d'extinction, afin de les recueillir séparément. Toutes les cendres humides recueillies dans la cuve d'extinction au cours d'un essai étaient déposées dans un camion d'évacuation des cendres préalablement pesé à vide (point nº 6). On a prélevé au hasard des échantillons de cendres, directement des camions, pour déterminer leur teneur en eau et en imbrûlés.

Envols de la chaudière et de l'économiseur. - La chute par laquelle sont acheminés les envols de la chaudière de récupération de chaleur a été modifiée afin de recueillir toutes les cendres volantes tombées dans les trémies de la chaudière et de l'économiseur pour les échantillonner et mesurer les quantités produites (point nº 7).

Particules captées par l'électrofiltre. - On a recueilli toutes les particules captées par l'électrofiltre pour les échantillonner (point nº 8). La quantité captée et la couleur sont d'excellents indices du rendement de l'électrofiltre et des émissions de particules.

Gaz de combustion. - L'échantillonnage des gaz en continu s'est fait dans une zone de forte turbulence de la cheminée, à la sortie du ventilateur de tirage. On a aussi fait des prélèvements dans la conduite d'évacuation horizontale de l'unité nº 4 pour le dosage des composés organiques, des métaux lourds, du mercure, des gaz acides et des particules ainsi que l'analyse granulométrique. La plate-forme d'échantillonnage des gaz constituait le point d'échantillonnage nº 9.

Acquisition des données. - Durant tous les essais, un système d'acquisition de données nous a permis de surveiller le déroulement du processus, de recueillir en continu des données sur les gaz et de mesurer les températures. Les données relatives à l'incinération proprement dite ont été rassemblées, enregistrées et affichées en temps réel (point nº 1).

3.3 Essais de caractérisation

Le but des essais de caractérisation était de donner à l'équipe l'occasion de se familiariser avec l'installation, de mettre à l'essai et perfectionner les systèmes de traitement des données et d'échantillonnage et enfin, d'évaluer les possibilités de fonctionnement de l'installation afin d'arrêter les conditions optimales pour les essais de

performance. Essentiellement, les essais de caractérisation ont consisté à ne changer qu'un paramètre du processus d'incinération à la fois, les autres conditions de fonctionnement restant constantes, afin de voir comment l'unité fonctionnerait et quelle influence le paramètre ajusté aurait sur sa performance générale. Pour faire autant d'essais que possible, la période d'échantillonnage a été limitée à deux heures pour les essais de caractérisation.

Comme on peut le voir à la figure 3.2, on a constamment contrôlé les données recueillies sur le processus ainsi que les résultats de l'analyse en continu des gaz avant, pendant et après chacun des essais de caractérisation. On s'est servi des résultats ainsi obtenus pour aider les opérateurs à déterminer comment un changement donné agissait sur les émissions et pour vérifier si la caractérisation d'un mode d'opération ne pouvait pas être faussée par des variations de courte durée.

Comme il n'était possible de faire qu'un nombre limité d'essais, on a dressé la liste des paramètres à mesurer suivant leur importance afin que ceux qui influent le plus

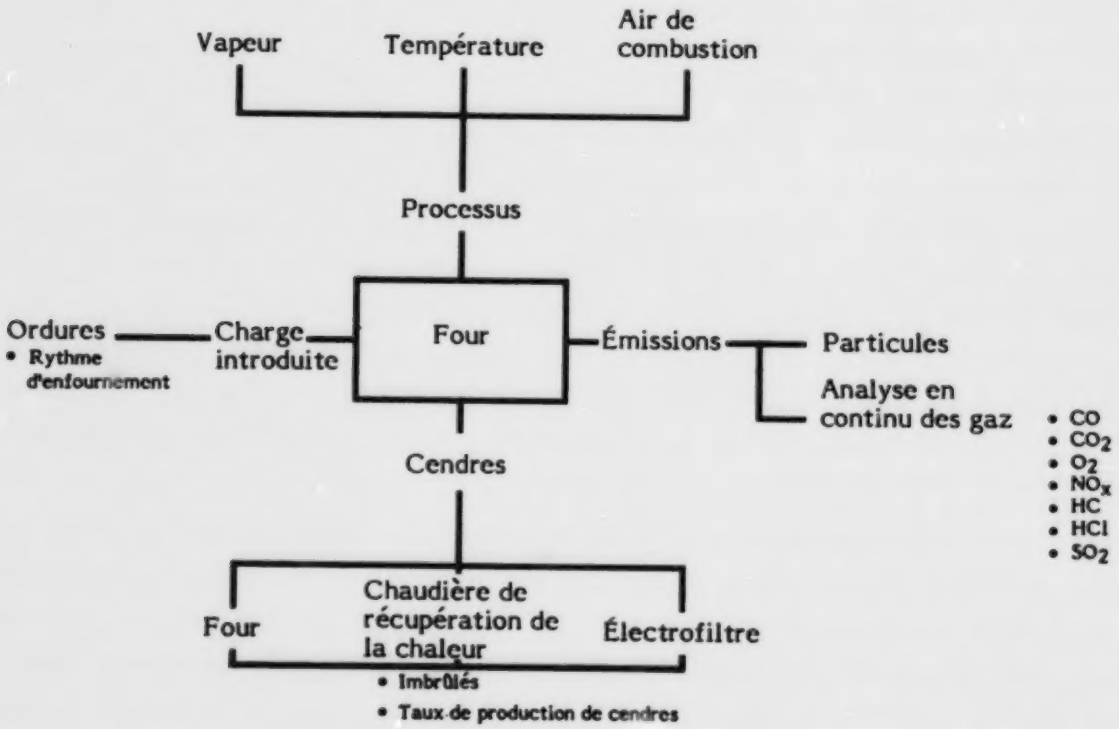


FIGURE 3.2 INSTALLATIONS D'INCINÉRATION DE LA CUQ - PARAMÈTRES DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION

sur l'ensemble du processus soient d'abord étudiés et que les moins importants viennent à la fin. L'ordre établi était:

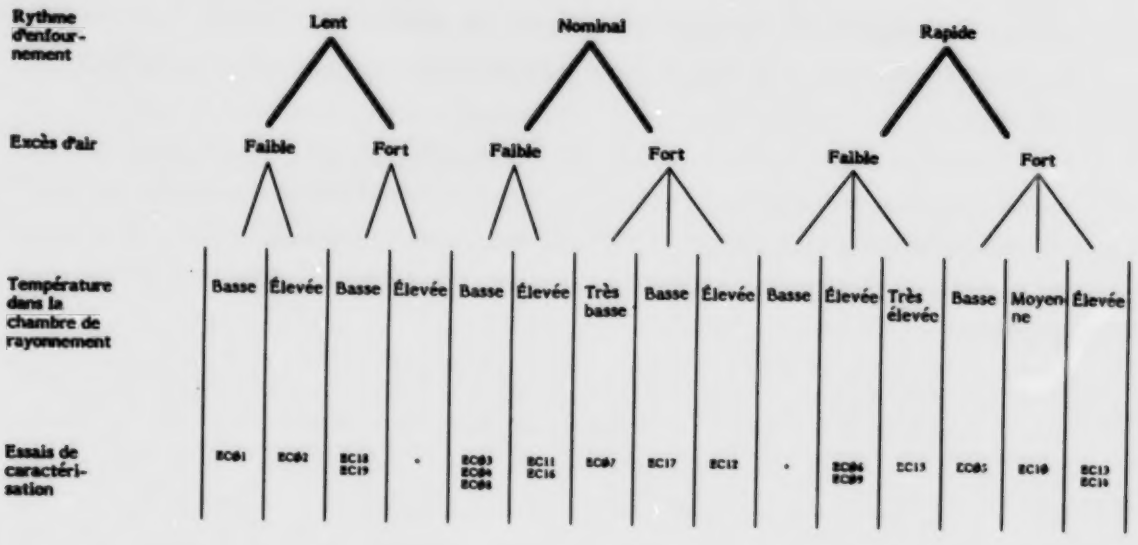
1) Rythme d'enfournement des ordures et(ou) débit de vapeur.
2) Excès d'air.
3) Répartition de l'air primaire et de l'air secondaire.
4) Distribution de l'air primaire.
5) Épaisseur de la couche de déchets sur la grille de combustion principale.
6) Épaisseur de la couche de cendres sur la grille d'achèvement de la combustion.
7) Rapport entre l'admission d'air secondaire à l'avant et à l'arrière.
8) Températures dans la chambre de rayonnement.

À la figure 3.3, on peut voir les différentes conditions dans lesquelles on a étudié les paramètres retenus pour les essais de caractérisation. Ainsi, on a choisi trois valeurs pour le rythme d'enfournement des ordures: lent, nominal et rapide. Dans chaque cas, on a fait un essai avec excès d'air faible et élevé. On a aussi voulu étudier ces deux régimes d'admission d'air avec des températures basses et élevées dans la chambre de rayonnement, mais on a jugé impossible d'atteindre certaines températures à cause de la qualité médiocre des ordures à incinérer au moment de l'essai ou simplement parce que les conditions n'étaient pas vraiment réalisables. Dix-neuf essais de caractérisation ont été nécessaires pour démontrer comment la performance de l'installation et les émissions changent lorsque les conditions de fonctionnement sont différentes.

Les essais de caractérisation (EC) nous ont permis de faire une évaluation générale de la performance de l'unité et d'arrêter les conditions dans lesquelles les essais de performance (EP) seraient réalisés. Ainsi, on a fait les constatations suivantes:

- L'incinérateur peut fonctionner de façon stable aux trois débits de vapeur étudiés (20, 28 et 32 t/h). La teneur en monoxyde de carbone baisse facilement en deçà de 100 ppm lorsque le débit de vapeur est élevé et tombe à moins de 50 ppm lorsque le rythme d'enfournement est lent ou égal au rythme nominal.

- C'est avec un rapport air primaire/air secondaire d'environ 60/40 que l'on obtient les conditions les plus stables et des teneurs en monoxyde de carbone relativement basses. En revanche, un rapport de 90/10 a entraîné les plus fortes teneurs en monoxyde de carbone enregistrées. Il y a donc une relation marquée entre le rapport de l'air primaire sur l'air secondaire et la teneur en monoxyde de carbone, si bien que cette relation a été retenue comme paramètre important pour les essais de performance.



[a] Température voulue impossible à atteindre dans les conditions d'enfournement et d'excès d'air indiquées.

FIGURE 3.3 INSTALLATIONS D'INCINÉRATION DE LA CUQ - CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DURANT LES ESSAIS DE CARACTÉRISATION

- La régulation du rapport entre air primaire et air secondaire ne semble pas être un facteur déterminant, que ce rapport soit constant ou au contraire variable en fonction des fluctuations de la température dans la chambre de rayonnement. Toutefois, on a constaté que si le rapport est maintenu à une valeur fixe, la température dans la chambre de rayonnement tend à être moins uniforme. Or, selon les spécialistes de la combustion et les organismes de réglementation, la température est un facteur fondamental de la destruction des composés organiques en traces; on a donc préféré faire les essais de performance avec un mode de fonctionnement où le rapport air primaire sur air secondaire s'ajuste de manière à maintenir une température uniforme dans la chambre de rayonnement.

- On a constaté que si la proportion d'air primaire injecté dans la première zone de combustion dépasse les valeurs recommandées par Von Roll, la couche de matières en combustion est moins épaisse sur la grille d'achèvement de la combustion et que les cendres sont de meilleure qualité. Par contre, la quantité de cendres volantes et de particules incandescentes entraînées dans la chaudière augmentent. Pour réduire le plus possible les émissions et obtenir une performance concordant avec les

pratiques modernes, on a préféré choisir pour les essais de performance un mode de fonctionnement où la distribution de l'air primaire respecte les recommandations de Von Roll.

- Les modifications apportées au circuit de distribution d'air secondaire (c.-à-d. rapport entre les admissions à l'avant et à l'arrière) ne semblent pas influer de façon significative sur la performance. Par conséquent, on a opté pour un rapport variable permettant de régulariser la température plutôt que pour un régime d'admission d'air avec rapport constant.

- Il semble que l'apport total d'air primaire soit un paramètre déterminant si l'on veut que la teneur en monoxyde de carbone et les émissions de particules soient faibles. (Les essais de caractérisation ont montré qu'en cas d'apport très élevé d'air primaire, la teneur en monoxyde de carbone et la quantité de particules entraînées étaient élevées.) On a donc conclu que le débit total d'air primaire était un paramètre qu'il fallait étudier à tout prix lors des essais de performance.

- En général, l'incinération a donné de bons résultats lorsqu'on a fait en sorte que la couche en combustion sur les grilles reste uniforme et que les flammes n'atteignent pas les tubes écrans à l'entrée de la chaudière. Ces conditions correspondaient à un rapport air primaire sur air secondaire de 60/40 et une faible teneur en monoxyde de carbone. Comme on a constaté que cette dernière devient maximale lorsque le processus d'incinération est perturbé et qu'on savait que l'analyseur employé dans les essais de caractérisation était un instrument fiable, on a conclu que la teneur en monoxyde de carbone était un autre paramètre qu'il faudrait surveiller de près lors des essais de performance.

- Le réglage automatique de l'allure des grilles en fonction du débit de vapeur et de la teneur en oxygène a donné une performance constante et reproduisible, et a été retenu pour les essais de performance. On avait d'ailleurs eu de la difficulté à stabiliser le processus dans certaines conditions lorsque le réglage était manuel.

- Durant les essais de caractérisation, les apports d'air en excès et les températures dans la chambre de rayonnement ont beaucoup varié (excès d'air: de 40 à 162 p. 100; températures: de 805 à 1099 °C). Bien que d'autres facteurs semblent influencer tout autant la performance (et en particulier la teneur en monoxyde de carbone), l'excès d'air et la température dans la chambre de rayonnement semblent déterminants pour un bon déroulement du processus d'incinération. De nombreux spécialistes de la combustion et organismes de réglementation soutiennent que la

température est le principal facteur pour la destruction des composés organiques présents en traces; on a donc placé la température dans les premiers paramètres à étudier dans les essais de performance.

3.4 Essais de performance

L'analyse approfondie des résultats des essais de caractérisation nous a conduit à retenir cinq modes de fonctionnement pour élaborer la matrice des essais de performance (voir figure 3.4). Nous recherchions par ces essais à définir la performance de l'installation à trois débits de vapeur (faible, nominal, élevé) et quelles étaient les conditions satisfaisantes et non satisfaisantes au débit nominal de vapeur. Comme l'indique la figure 3.4, on a étudié trois des cinq conditions de fonctionnement retenues au débit de vapeur nominal, et une seule à un débit de vapeur faible et élevé, ces deux derniers n'étant qu'occasionnels.

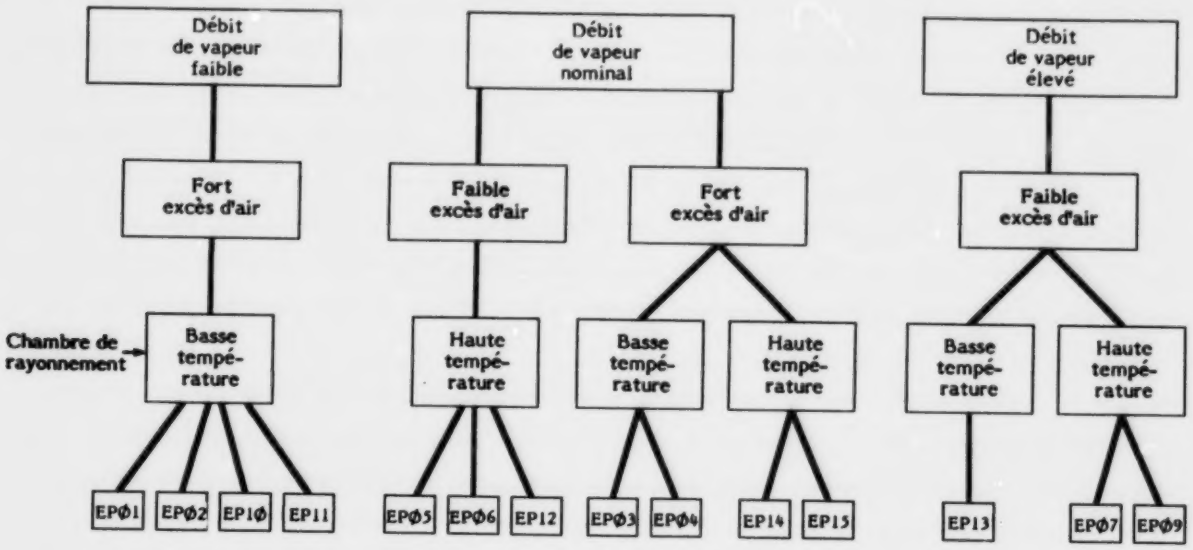


FIGURE 3.4 INSTALLATIONS D'INCINÉRATION DE LA CUQ - CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DURANT LES ESSAIS DE PERFORMANCE

On a choisi d'étudier trois modes de fonctionnement au débit nominal de vapeur afin d'obtenir, avec les sommes qui nous étaient imparties, suffisamment de données sur le plus grand nombre de conditions possibles à un rythme d'enfournement normal. La stratégie adoptée nous a permis de faire une comparaison entre les conditions

de fonctionnement "satisfaisantes" au débit de vapeur nominal et aux deux autres débits. Il a aussi été possible de comparer quelles étaient les conditions satisfaisantes et les conditions médiocres au débit nominal de vapeur.

Essentiellement, on a créé les conditions recherchées pour les essais de performance en modifiant le débit de vapeur et les débits d'air primaire (sous la zone de combustion) et secondaire (au-dessus de la zone de combustion). Chacun des modes de fonctionnement se caractérisait par des températures, des teneurs en oxygène et des émissions de monoxyde de carbone différentes.

Pour chaque essai de performance, l'unité devait fonctionner de manière stable au moins 10 heures en plus du temps nécessaire pour que le processus se stabilise et que l'essai commence. Sur les 10 heures réservées à l'essai, quatre au moins étaient consacrées aux échantillonnages manuels pour la mesure des dioxines par exemple.

On préfère généralement faire les essais de performance en triple plutôt qu'en double. Les essais en double permettent d'étudier plus de conditions de fonctionnement, mais avec les essais en triple, la fiabilité statistique des données est meilleure. Le programme d'essais de performance a consisté à étudier trois conditions de fonctionnement en essais en triple et deux conditions en essais en double. Le premier essai (EP1) constituait un test de rodage au débit de vapeur le plus bas. Cet essai a permis aux équipes d'échantillonnage et opérateurs de se familiariser avec tous les aspects d'un tel programme d'évaluation de performance et d'apprendre ce qu'ils avaient à faire. Il a fallu abandonner un essai (EP08) en raison d'une défaillance d'un montage d'échantillonnage isocinétique des gaz pour le dosage des composés organiques en traces. Des quinze essais prévus, treize ont été menés à bien.

L'essai EP13 est présenté séparément des essais EP07 et EP09 car on a estimé que les conditions dans lesquelles il s'est déroulé n'étaient pas compatibles avec les paramètres visés. Durant cet essai, on a eu d'énormes difficultés à stabiliser le processus à cause de la présence de masses d'ordures humides agglomérées et les contraintes que créait l'accumulation consécutive de scories dans la chambre de combustion. Étant donné que ces conditions ne se comparent pas à celles des deux autres essais (EP07 et EP09) de cette série en triple, on a estimé qu'elles ne représentaient pas des "conditions satisfaisantes en cas de rythme d'enfournement rapide".

Les essais en triple (c.-à-d. conduits dans de bonnes conditions de fonctionnement aux trois rythmes d'enfournement) se déroulaient de façon à ce que l'intervalle entre le premier et le troisième essai de chaque série soit aussi long que possible. De cette manière, toutes les ordures qui se trouvaient dans le silo au moment du premier essai

avaient été incinérées et remplacées par un nouveau chargement, éventuellement de qualité différente, avant que le troisième essai commence. Ainsi, il s'est écoulé neuf jours entre le premier et le dernier des essais en triple conduits à un rythme d'enfournement lent et au rythme nominal, et sept jours entre le premier et le troisième essai conduits à un rythme d'enfournement rapide.

Les paramètres étudiés dans ces essais sont présentés à la figure 3.5.

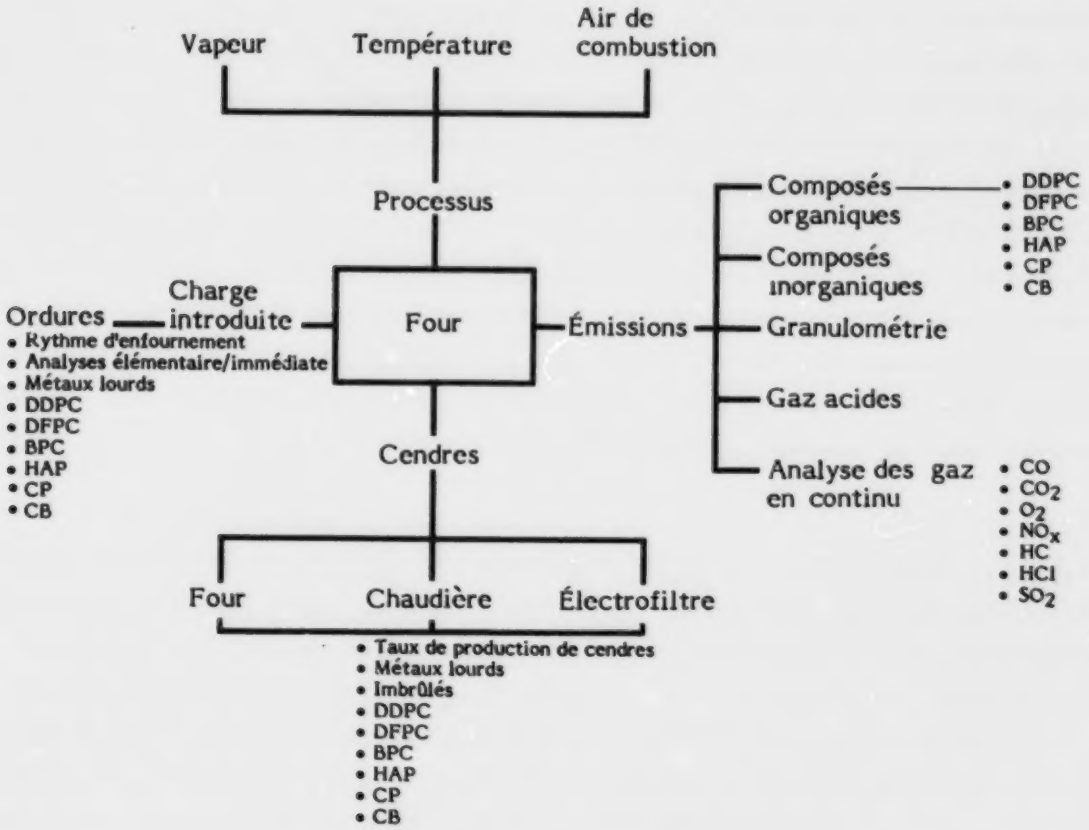


FIGURE 3.5 INSTALLATIONS D'INCINÉRATION DE LA CUQ - PARAMÈTRES ÉTUDIÉS LORS DES ESSAIS DE PERFORMANCE

4 PROTOCOLES D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ANALYSE

4.1 Généralités

Les appareils et les méthodes d'échantillonnage employés durant le programme d'essais étaient conformes aux normes reconnues lorsqu'il y en avait. On a noté tous les cas où l'on s'est éloigné de la norme reconnue ainsi que les raisons motivant le changement apporté. Les méthodes utilisées pour les essais de l'incinérateur à combustion à deux étapes à l'Île-du-Prince-Édouard (2) et pour l'étude des techniques de dépollution des gaz de combustion (3) réalisés dans le cadre du PNEEI ont été reprises dans la mesure du possible. On a déterminé si les méthodes et protocoles d'analyse pouvaient s'appliquer tels quels à l'installation de la CUQ et on les a adaptés au besoin.

On a prélevé des échantillons des ordures et des cendres évacuées du four, de la chaudière, de l'économiseur et de celles captées par l'électrofiltre pour en doser les métaux et les composés organiques en traces. On a échantillonné les gaz de cheminée (échantillonnage manuel et en continu) dans la conduite d'évacuation des gaz de carneau. Lorsqu'il y a eu lieu, on a récupéré les échantillons suivant les méthodes standard reconnues ou suivant la méthode la "plus pratique" s'il était nécessaire de s'écarter de la norme. Dans ce chapitre, on décrit brièvement les méthodes employées pour l'échantillonnage et le dosage des composés organiques et inorganiques.

4.2 Ordures

4.2.1 Échantillonnage. - Durant chaque essai de performance, on désignait au hasard et à toutes les heures environ l'une des bennes venant d'arriver afin qu'une partie de son chargement soit déversée sur le plancher nettoyé à la vapeur. À chaque essai, on échantillonnait quatre ou cinq chargements; les ordures étaient étalées, triées pour en enlever les gros morceaux de métal et les matériaux jugés indésirables, et finalement placées dans une broyeuse au moyen d'un petit chargeur. Après le broyage, on façonnait des cônes qu'on séparait en quatre parties dont on tirait un échantillon représentatif pour les analyses. L'échantillon a subi d'autres traitements en laboratoire, par exemple séchage, broyage ou trituration, avant l'analyse.

4.2.2 Rythme d'enfournement. - On a déterminé sur une base horaire le poids total d'ordures enfournées durant la période d'essai. Pour ce faire, on pesait le grapin du pont roulant juste avant qu'il ne vide sa charge dans la trémie de chargement. On notait alors l'heure, le poids et la nature du chargement. Le poids était également versé à l'ordinateur pour l'affichage du rendement en temps réel.

Le poids indiqué par les balances comportait une marge d'erreur de 0,25 p. 100 pour la gamme de charges considérées. Au début et à la fin de chaque jour d'essai, on réajustait les balances à zéro au moyen du grapin du pont roulant qu'on pesait aussi avant et après chaque essai, pour s'assurer que la balance était encore ajustée.

4.3 Échantillonnage des cendres

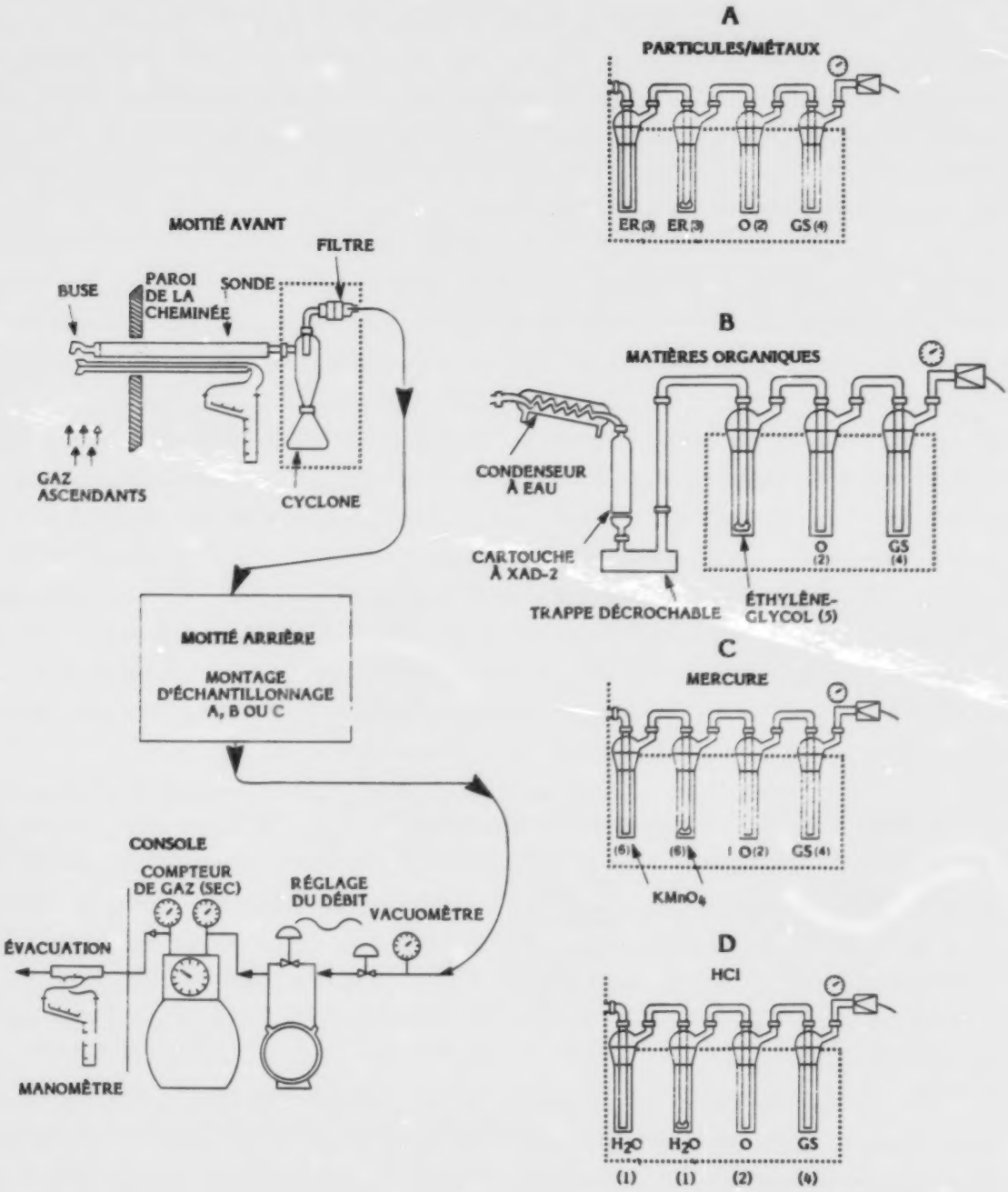
On a échantillonné les *cendres d'incinération* par un orifice spécialement ménagé à cette fin, en face de la grille d'achèvement de la combustion. Toutes les quinze minutes, on prélevait des cendres au moyen d'une pelle d'acier inoxydable à différents endroits dans le four afin d'obtenir un échantillon représentatif. On versait ensuite les cendres dans un récipient en acier inoxydable contenant de la glace sèche; une fois qu'elles étaient refroidies, on les transférait dans un fût de 200 l (45 gallons) pesé à vide. À la fin de l'essai, on vidait le contenu des fûts sur un plancher propre; les cendres étaient mélangées et réunies en cône que l'on divisait en quatre portions. L'une d'elle était placée dans un sceau de 23 l (5 gallons) doublé de plastique.

Pour échantillonner les *cendres volantes de la chaudière et de l'économiseur*, on les recueillait à chaque essai dans un fût de 200 l pesé à vide, 30 minutes après le début de l'essai. Une fois l'essai terminé, on mélangeait soigneusement les cendres sur un plancher propre puis on les façonnait en cône que l'on divisait en quatre portions. Chaque portion était placée dans un récipient en verre d'étanchéité éprouvée.

Pour recueillir les *cendres captées par l'électrofiltre*, on plaçait un récipient spécialement conçu sous le système de collecte des cendres. Lorsqu'il était rempli (au bout de 10 ou 20 minutes), on le remplaçait et on vidait les cendres recueillies dans un fût de 200 l pesé à vide. Deux échantillonneurs tubulaires ressemblant à un carrotier étaient introduits dans le fût pour prélever un échantillon. À la fin de l'essai, les échantillons prélevés étaient rassemblés et mélangés, puis on façonnait un cône que l'on divisait en quatre portions. Celles-ci étaient placées individuellement dans un récipient en verre d'étanchéité éprouvée.

L'échantillonnage des *cendres de la cuve d'extinction* était fait par prélèvement d'un échantillon représentatif à même un camion sur lequel étaient chargées des cendres extraites du silo. L'échantillon était placé dans un récipient en verre propre.

Avant l'analyse, tous les échantillons de cendres étaient préparés, c'est-à-dire qu'ils étaient broyés, triturés, réduits en poudre, ou séchés selon l'usage auquel ils étaient destinés.



LÉGENDE			
	1 = EAU (H_2O)	3 = EAU RÉGALE (ER)	5 = ÉTHYLÈNEGLYCOL ($C_2H_4(OH)_2$)
	2 = VIDE (O)	4 = GEL DE SILICE (GS)	6 = PERMANGANATE DE POTASSIUM ($KMnO_4$)

FIGURE 4.1 MONTAGES D'ÉCHANTILLONNAGE

4.4 Échantillonnage des gaz de carneau

4.4.1 Dosage en continu. - Le dosage en continu des gaz de carneau s'est fait à la sortie de l'électrofiltre, ce qui nous a permis de mesurer simultanément la teneur en:

monoxyde de carbone (CO)	oxydes d'azote (NO_x)
dioxyde de carbone (CO_2)	acide chlorhydrique (HCl)
oxygène (O_2)	hydrocarbures totaux (HCT) (à chaud et à froid)
anhydride sulfureux (SO_2)	

Un dispositif d'échantillonnage a été spécialement conçu et construit en utilisant les critères de l'*American Society for Testing and Materials* (ASTM) *Methodologies Procedure PT-10* applicables aux points d'échantillonnage. En raison de la diversité des analyseurs utilisés, il a fallu trois systèmes de conditionnement indépendants: un pour le HCl, un autre pour les HCT (à chaud) et un troisième pour les composants multiples (SO_2, NO_x, CO, CO_2, HCT (à froid) et O_2). On a extrait à la source des échantillons de gaz représentatifs que l'on a débarrassés des particules, et selon le type d'analyseur, de l'eau non liée. Pour l'étalonnage, on s'est servi de gaz de zéro et de gaz commerciaux certifiés, à concentration connue, et vérifiés par les meilleures méthodes de référence. Chacun des systèmes a été étalonné juste avant et à la fin de chaque essai. De plus, des gaz d'étalonnage injectés à l'entrée de l'analyseur, à l'entrée du traitement primaire et à l'entrée de la conduite d'échantillonnage chauffée ont permis de contrôler l'ensemble de l'installation d'analyse des gaz et de repérer des fuites éventuelles.

4.4.2 Échantillonnage manuel. - On s'est servi de montages d'échantillonnage manuel pour les prélèvements destinés au dosage des métaux et des particules, des composés organiques en traces, du mercure et des gaz acides présents dans les gaz de carneau et pour la répartition granulométrique des particules. On donne au tableau 4.1 la liste des méthodes employées pour l'échantillonnage des gaz. À l'exception des échantillons prélevés pour le classement granulométrique et le dosage des gaz acides, les échantillons ont été prélevés par quatre orifices et il y avait échantillonnage isocinétique à plusieurs points des parcours installés dans la conduite d'évacuation des gaz de l'unité n° 4. Tous les montages se déplaçaient simultanément et la durée d'échantillonnage était d'au moins quatre heures pour tous les essais de performance. On vérifiait s'il y avait des fuites au départ et à la fin de chaque parcours. Les montages d'échantillonnage sont schématisés à la figure 4.1.

4.5 Méthodes d'analyse

Toutes les analyses portant sur des composés organiques ont été réalisées au

TABLEAU 4.1 MÉTHODES D'ÉCHANTILLONNAGE MANUEL DES EFFLUENTS GAZEUX

Paramètre	Équipement et méthode
Composés organiques en traces - dioxines, furannes, biphényles polychlorés, chlorophénols, chlorobenzènes, hydrocarbures polycycliques aromatiques	Montage E modifié (projet nº 4 de l'ASME, octobre 1984)
Mercure	Montage E modifié (4)
Particules, métaux à l'état de traces, principaux métaux	Montage E modifié (5)
Granulométrie, gaz acides	Impacteur à cascades, méthode à point d'échantillonnage unique, prélèvement dans la cheminée et montage E (4)

Centre environnemental de River Road d'Environnement Canada. Les Diagnostic Research Laboratories se sont occupés des analyses immédiates, des analyses élémentaires, de la détermination du pouvoir calorifique supérieur (PCS) et de l'analyse des matières combustibles, tandis que la Fondation de recherches de l'Ontario a procédé aux dosages des métaux. Dans la plupart des cas, on s'est servi de méthodes standard.

4.5.1 Métaux. - Les échantillons prélevés en vue des dosages des métaux ont été préparés suivant leur nature et le genre d'analyses auxquelles on les destinait. La préparation consistait notamment en une digestion à l'eau régale suivie d'une concentration puis des analyses proprement dites. Pour les métaux en traces, on a eu recours à la spectroscopie d'émission de plasma en courant continu, et pour l'arsenic (As), l'antimoine (Sb), le sélénium (Se) et le tellure (Te), on a employé la spectrophotométrie d'absorption atomique.

4.5.2 Composés organiques. - Les analyses des ordures, des cendres et des gaz visaient à rechercher six classes de composés organiques, soit: les dibenzo-*p*-dioxines polychlorées (DDPC), les dibenzofurannes polychlorés (DFPC), les biphényles polychlorés (BPC), les chlorobenzènes (CB), les chlorophénols (CP) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Les échantillons dans lesquels on a recherché des composés organiques ont été essentiellement soumis aux procédés de traitement et d'analyse suivants:

a) enrichissement avec une solution étalon de remplacement;

b) extraction au solvant des polluants organiques de la matrice;

c) purification de l'extrait brut de façon à ce qu'il soit débarrassé des produits organiques extraits non recherchés et séparation des composés organiques recherchés en quatre fractions en vue des analyses spécifiques à la classe chimique;

d) chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse (CG/SM) de chaque fraction;

e) interprétation des données et détermination de la teneur en composés organiques recherchés.

4.5.3 Divers. - Au tableau 4.2, on donne un sommaire des autres analyses (c.-à-d., élémentaire, immédiate, dosage du mercure, chlorures, granulométrie, etc.) auxquelles on a soumis les échantillons recueillis, en indiquant la méthode standard employée et les mesures faites.

4.5.4 Lixiviation. - Pour évaluer la mobilité des polluants organiques présents dans les cendres, on s'est servi d'un procédé modifié d'extractions multiples par lots séquentiels. On a fait une extraction à l'eau distillée avec un rapport liquide sur solide de 20/1 et l'on a repris l'opération avec des rapports plus élevés.

Pour déterminer la mobilité des métaux lourds présents dans les cendres en milieu non acide, on s'est servi du procédé d'extractions multiples par lots séquentiels. Il s'agissait de répéter cinq fois une extraction par lots à l'eau distillée avec un rapport liquide sur solide de 20/1.

Pour caractériser les espèces métalliques présentes dans les cendres, on s'est servi d'un procédé d'extraction chimique séquentiel. Cette méthode a permis de déterminer les risques de lixiviation des métaux présents dans les cendres à court et à long termes.

Enfin, on a mesuré le pouvoir neutralisant des cendres recueillies à divers emplacements par la méthode C400-64 de l'ASTM, mais en utilisant une solution d'acide nitrique de 0,5 *N* au lieu d'acide sulfurique de 0,3 *N*.

On a aussi mesuré la teneur en métaux lourds des cendres et du lixiviat par spectroscopie d'absorption atomique (flamme, plasma d'argon à couplage inductif; absorption atomique; flamme, four au graphite).

4.6 Assurance et contrôle de la qualité

Étant donné le vaste champ d'application du programme et le nombre de participants, il a fallu déployer un effort considérable pour que le contrôle de la qualité

TABLEAU 4.2 SOMMAIRE DES MÉTHODES D'ANALYSE

Paramètre	Technique	Méthode de référence
Composés organiques en traces	Chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse	Environnement Canada/ PNEEI
Métaux en traces	Spectroscopie d'émission de plasma	Environnement Canada/ PNEEI
Antimoine, sélénium, tellure, arsenic, étain	Spectrophotométrie d'absorption atomique	Environnement Canada/ PNEEI
Mercure	Spectroscopie d'absorption atomique sans flamme à vapeur froide	Environnement Canada/ PNEEI
Chlorure (HCl)	Chromatographie d'échange d'ions	Environnement Canada/ PNEEI
Charge en particules	Gravimétrie	Environnement Canada (4)
Granulométrie	Gravimétrie	Environnement Canada (4)
Soufre	Turbidimétrie	ASTM D3177
Pouvoir calorifique (PCS)	Bombe calorimétrique	ASTM D2015-77
Chlore	Argentométrie	ASTM D2361
Matières combustibles (perte à l'allumage)	Four à moufle (750 °C)	ASTM D3174-82
Matières volatiles	Four à moufle	ASTM D3175
Cendres	Four à moufle	ASTM D3174
Carbone, hydrogène	Four Leco	ASTM D3178
Azote	Four Leco et méthode Kjeldahl	ASTM D3179
Humidité	Évaporation	ASTM EE790

reste rigoureux. La Lavalin Inc., le principal entrepreneur, a élaboré son propre programme interne d'assurance et de contrôle de la qualité (AQ/CQ). En outre, le ministère de l'Environnement de l'Ontario a confié à la *Concord Scientific Corporation* le soin d'élaborer un programme externe indépendant de contrôle et d'assurance de la qualité.

Les deux programmes ont révélé que les essais réalisés à l'incinérateur avaient été bien exécutés, conformément aux méthodes d'échantillonnage et d'analyse décrites, avec des instruments adéquatement étalonnés et vérifiés. Les échantillons recueillis durant le programme d'essais ont été jugés représentatifs et les données étaient complètes

et exactes. Le vérificateur du contrôle et de l'assurance de la qualité estime qu'en autant qu'il le sache, toutes les erreurs, omissions et problèmes relevés sont correctement signalés dans les rapports.

Le programme d'AQ/CQ interlaboratoire a révélé que dans tous les laboratoires concernés, les analyses portant sur les composés organiques et les métaux ont été faites avec un degré acceptable de précision (écart type relatif (ETR) de 30 p. 100 dans le cas des métaux et de 50 p. 100 dans le cas des composés organiques) et d'exactitude (récupération: > 70 p. 100 et < 130 p. 100). Les résultats des laboratoires d'assurance de la qualité ont confirmé ceux des grands laboratoires. La comparaison interlaboratoire est toutefois médiocre dans le cas des dosages de l'arsenic, du baryum et des chlorophénols (sans correction pour le taux de récupération des produits d'enrichissement) présents dans les cendres provenant de la chaudière et de celles captées par l'électrofiltre.

5 RÉSULTATS DES ESSAIS DE PERFORMANCE

Ce chapitre résume brièvement les résultats des essais de performance (EP) et les principales conclusions qu'on en a tirées. Les résultats des essais de caractérisation nous avaient conduits à retenir cinq conditions de fonctionnement pour les essais détaillés de performance. Tel que mentionné précédemment, treize des quinze essais de performance ont été menés à bien. La figure 5.1 indique de quels essais il s'agit et les conditions de fonctionnement dans lesquelles ils se sont déroulés.

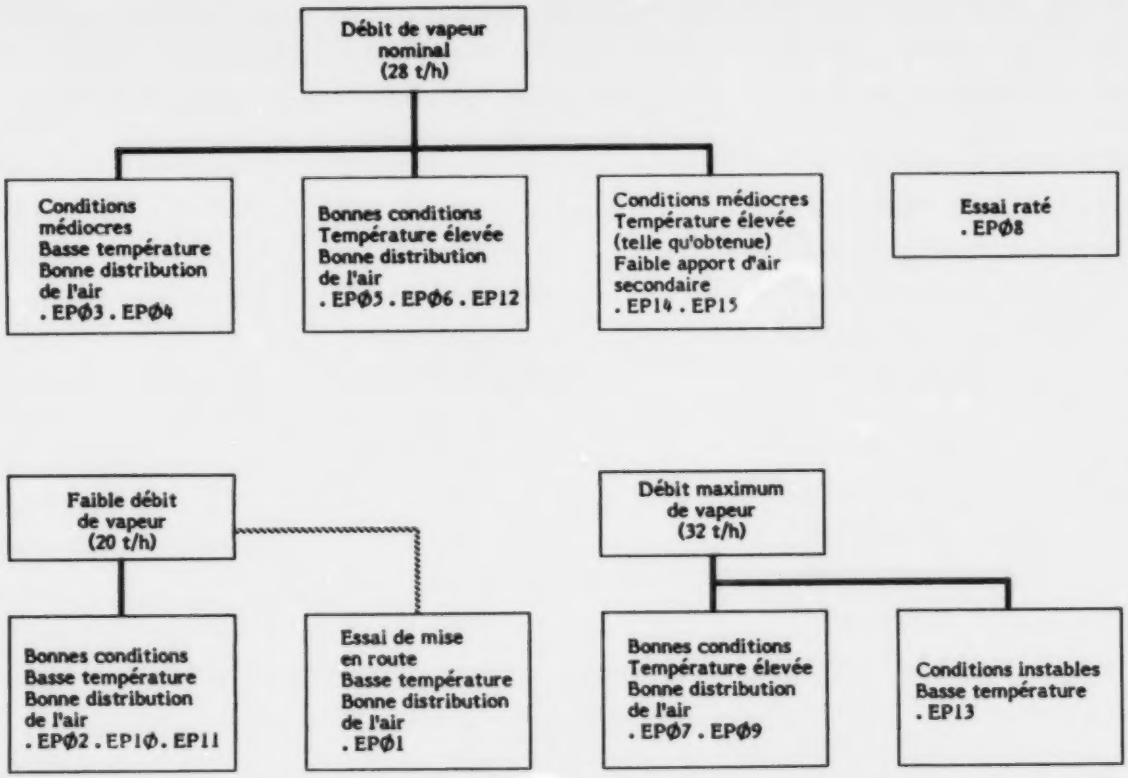


FIGURE 5.1 CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DURANT LES ESSAIS DE PERFORMANCE

5.1 Comparaison des données des essais d'un même groupe

Afin de déterminer si chaque série d'essais effectués en double ou en triple dans les conditions données à la figure 5.1 traduisait bien en moyenne les conditions

particulières définies pour les essais, les données de chacun des essais conduits à l'intérieur d'un groupe ont été étudiées très méthodiquement afin d'identifier les similitudes et les différences. Certains des résultats les plus pertinents sont résumés dans les tableaux 5.1 et 5.2. Ils ont été regroupés par conditions de fonctionnement. Des paramètres de fonctionnement comme la production de vapeur, le rapport air primaire/air secondaire, la température dans la chambre de rayonnement, la température à l'entrée de la chaudière, l'excès d'air et la vitesse des gaz et leur composition ont été examinés. On a de plus étudié toutes les données obtenues en continu pour les gaz et les résultats des prélèvements en cheminée au moyen de montages et ce, pour chaque essai à l'intérieur de chaque groupe.

Il en est ressorti que l'essai EP13 n'était pas représentatif des conditions de fonctionnement voulues, ce qui explique que cet essai est détaché des essais EP07 et EP09 sur la figure 5.1. Tous les autres essais à l'intérieur des autres groupes ont été jugés comparables et représentatifs des conditions de fonctionnement données. C'est donc sur la base de la moyenne établie pour le groupe que les conditions de fonctionnement et les émissions seront comparées dans le reste du rapport. Les résultats pour chacune des cinq conditions de fonctionnement retenues pour les essais de performance sont résumés dans les figures 5.2 à 5.6.

5.2 Conditions de fonctionnement

Le tableau 5.3 résume les principaux paramètres de fonctionnement pour chacune des conditions de fonctionnement étudiées. Les essais ont été conduits dans des conditions très diverses. En modifiant les principaux paramètres pour obtenir des conditions de fonctionnement distinctes, nous avons obtenu les plages de valeurs suivantes, établies sur la base d'une moyenne par groupe:

- Production de vapeur comprise entre 71 et 114 p. 100 de la valeur nominale.
- Températures de la chambre de rayonnement comprises entre 859 et 1046 °C.
- Excès d'air compris entre 78 et 140 p. 100.

5.2.1 Bonnes conditions de fonctionnement au taux nominal de production de vapeur. - Cette condition a servi de référence lorsque le processus se déroulait de façon stable avec un excès d'air relativement faible (78 p. 100), une température moyenne dans la chambre de rayonnement (1012 °C), un bon rapport air primaire/air secondaire (65/35) et une teneur en monoxyde de carbone assez faible (28 ppm).

5.2.2 Conditions de fonctionnement médiocres au taux nominal de production de vapeur. - On a choisi de conduire des essais dans de telles conditions afin de déterminer

TABLEAU 5.1 DONNÉES SUR LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT AJUSTÉS POUR LES ESSAIS DE PERFORMANCE
(Regroupées par conditions de fonctionnement)

	Bonnes conditions/ faible production de vapeur			Bonnes conditions/ production de vapeur nominale			Bonnes conditions/ production de vapeur élevée		Production de vapeur élevée	Conditions médiocres/ production de vapeur nominale/ basse température		Conditions médiocres/ production de vapeur nominale/ mauvaise distribution de l'air	
	EP02	EP10	EP11	EP05	EP06	EP12	EP07	EP09	EP13	EP03	EP04	EP14	EP15
Production de vapeur (t/h)	20,0	20,0	20,0	28,0	28,1	27,9	31,8	31,8	31,6	28,1	27,8	28,4	28,3
Rythme d'enfournement (t hum./h)	6,2	6,5	6,7	8,7	8,7	9,3	8,6	10,8	11,3	10,1	9,0	8,4	9,0
Rapport production vapeur/ordures enfournées (t/t)	3,2	3,1	3,0	3,2	3,2	3,0	3,7	2,9	2,8	2,8	3,1	3,4	3,1
Teneur en eau - ordures (%)	38,6	32,9	39,3	36,8	38,3	30,9	32,3	37,2	37,2	32,2	36,3	31,2	35,1
Humidité - gaz combustion (% vol.)	13,4	11,9	13,3	15,8	16,4	14,7	13,8	16,1	15,2	14,1	13,1	12,5	14,1
Rendement de la combustion (%)	99,99	99,98	99,98	99,98	99,98	99,97	99,96	99,96	99,94	99,94	99,93	99,87	99,86
Rendement énergétique (%)	62,4	60,5	62,0	67,3	60,5	63,3	67,9	64,4	58,8	60,5	59,7	64,8	61,8
Production de cendres - four (kg/h)*	1156	2365	1414	2311	2717	2210	1888	2324	2862	2749	2306	1797	2360
Pourcentage de la charge introduite	18,6	36,4	21,1	26,6	31,2	23,7	22,0	21,5	25,3	27,2	25,6	21,4	26,3
Imbrûlés (%)	4,0	3,3	0,6	1,5	11,9	4,1	7,5	2,8	14,6	2,3	6,0	1,9	6,4
Production de cendres - chaudière (kg/h)*	29,4	36,6	33,3	33,5	24,4	44,0	41,5	58,9	62,0	30,7	38,4	57,3	42,9
Pourcentage de la charge introduite	0,5	0,6	0,5	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4	0,7	0,5
Imbrûlés (%)	5,9	5,9	2,3	15,5	7,2	1,3	21,9	23,7	1,3	10,0	10,1	3,0	5,3
Cendres captées par l'électrofiltre (kg/h)*	46,0	46,6	43,5	47,0	54,2	71,0	65,8	92,4	128,4	131,6	131,0	121,8	110,8
Pourcentage de la charge introduite	0,7	0,7	0,6	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,5	1,2
Imbrûlés (%)	7,2	4,8	8,6	8,0	36,9	7,1	11,8	9,4	7,4	5,8	6,3	10,5	6,0
Débit des gaz de carneau (moyenne de 3 montages) (m^3N/mn)	874	910	875	828	844	953	945	985	1036	1130	1156	1055	1046
Apport total d'air (Bailey) (m^3A/mn)	477	553	498	546	541	550	625	750	725	918	960	540	555
Distribution de l'air de combustion:													
- Rapport air primaire/air secondaire	58:42	53:47	63:37	65:35	64:36	66:34	49:51	60:40	63:37	61:39	61:39	88:12	89:11
- Rapport air secondaire avant/arrière	42:58	56:44	44:56	39:61	31:69	42:58	60:40	64:36	64:36	47:53	50:50	27:73	25:75
Températures (°C):													
- Bas de la C.R.** (moyenne av./arr.)	849	875	869	1014	1030	992	1085	1006	997	861	856	992	964
- Haut de la C.R. (moyenne av./arr.)	637	688	688	777	774	793	839	791	799	672	655	747	718
- Entrée de la chaudière	712	688	689	813	817	785	836	809	769	724	700	745	762
- Cheminée	199	212	212	206	212	225	220	233	240	229	232	232	228

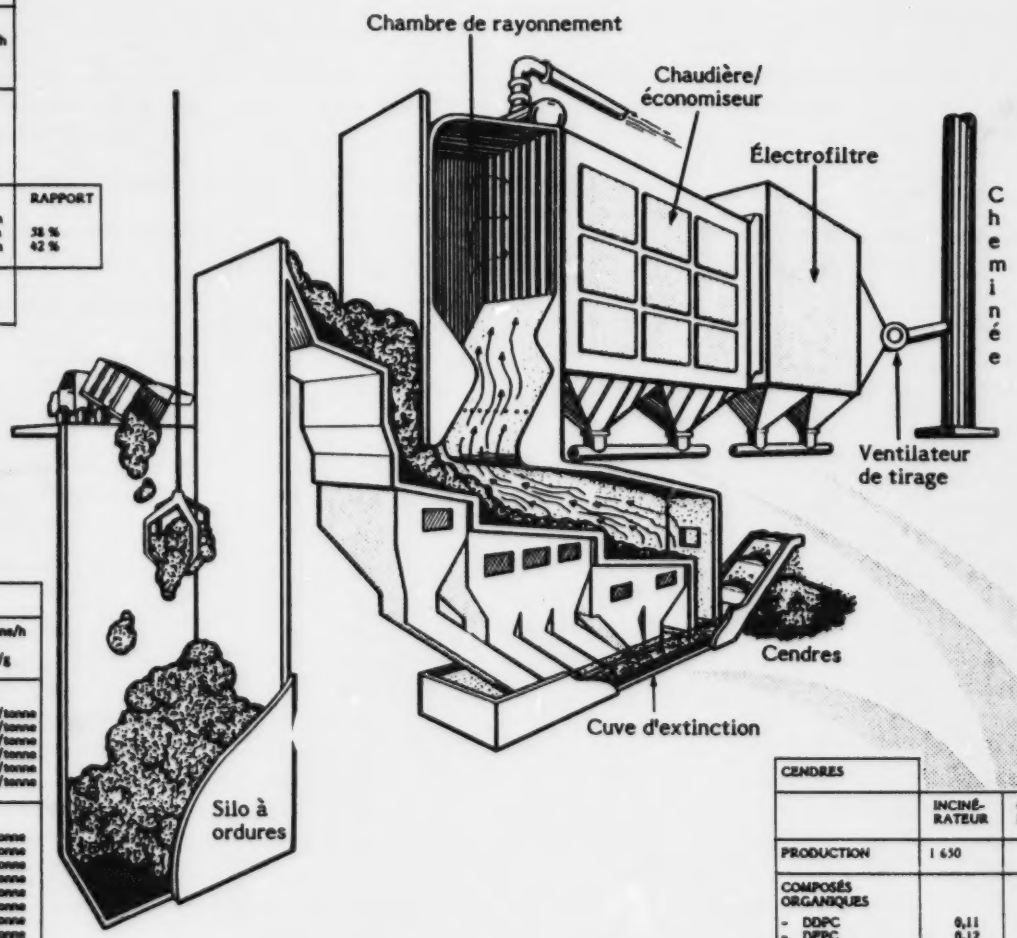
* Poids sec.
** Chambre de rayonnement.
m^3A: Mètres cubes actuels.

TABLEAU 5.2 DONNÉES RECUEILLIES LORS DES ESSAIS DE PERFORMANCE (Regroupées par conditions de fonctionnement)

	Bonnes conditions/ faible production de vapeur			Bonnes conditions/ production de vapeur nominale			Bonnes conditions/ production de vapeur élevée		Production de vapeur élevée	Conditions médiocres/ production de vapeur nominale/ basse température		Conditions médiocres/ production de vapeur nominale/ mauvaise distribution de l'air	
	EP02	EP10	EP11	EP05	EP06	EP12	EP07	EP09	EP13	EP03	EP04	EP14	EP15
Données échant. continu des gaz (rapportées à 12 % de CO_2)													
Dioxyde de carbone (%)	8	8	8	11	11	9	10	11	10	9	8	8	9
Monoxyde de carbone (ppm)	17	24	30	20	27	37	43	43	77	76	80	153	173
Oxygène (sec) (%)	13	13	12	9	9	10	10	10	10	12	12	12	11
Hydrocarbures totaux (à froid) (ppm)	2	3	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3
Hydrocarbures totaux (à chaud) (ppm)	6	4	5	s.o.	s.o.	4	s.o.	s.o.	s.o.	3	6	s.o.	2
Anhydride sulfureux (ppm)	160	209	175	178	186	225	192	128	178	145	160	162	151
Oxydes d'azote (ppm)	232	191	192	172	169	199	186	202	205	224	246	191	183
Chlorure d'hydrogène (ppm)	565	465	466	504	366	487	512	369	500	s.o.	453	594	447
Excès d'air (%)	143	152	126	69	75	91	84	84	92	128	132	116	110
Opacité (%)	26	31	30	32	29	39	35	30	36	35	36	36	35
Montage échant. particules													
- Teneur, à 12 % de CO_2 (mg/m^3N)	23,7	28,9	26,3	15,8	20,5	30,7	35,3	35,9	53,7	68,1	41,7	72,9	52,0
- Rapport émissions/enfournement (kg/t)	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,3
Montage échant. chlorure d'hydrogène													
- Teneur, à 12 % de CO_2 (ppm)	617	463	440	327	312	450	364	397	449	601	327	398	398
- Rapport émissions/enfournement (kg/t)	5,4	4,3	3,8	3,0	2,9	3,7	3,4	3,3	3,7	5,0	3,2	4,2	3,9
Montage échant. composés organiques (DDPC totales)													
- Teneur, à 12 % de CO_2 (ng/m^3N)	105	29	24	13	11	33	45	65	164	302	295	205	233
- Rapport émissions/enfournement ($\mu g/t$)	559	151	122	68	59	154	256	312	736	1444	1486	1065	1195
Montage échant. composés organiques (DFPC totaux)													
- Teneur, à 12 % de CO_2 (ng/m^3N)	179	81	84	49	32	52	101	100	118	287	310	336	277
- Rapport émissions/enfournement ($\mu g/t$)	950	429	423	261	171	247	570	480	532	1369	1565	1747	1421

s.o.: Sans objet.

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT			
VAPEUR			
- Débit	20	tonne/h	
- Pression	4300	kPa	
- Température	320	°C	
TEMPÉRATURES			
- Bas incinérateur	860	°C	
- Haut incinérateur	670	°C	
- Entrée chaudière	700	°C	
- Air combustion	32	°C	
DÉBIT D'AIR			RAPPORT
- Combustion	510	m^3/mn	
- Primaire	300	m^3/mn	58 %
- Secondaire	210	m^3/mn	42 %
RENDEMENT			
- Charge/émissions	61,6	%	



ÉMISSIONS À LA CHEMINÉE		
GAZ		
- Débit	890	m^3N/mn
- Température	210	°C
- Humidité	13,9	%
- Opacité	29,0	%
DONNÉES OBTENUES EN CONTINU		
- O_2	13	%
- CO_2	8	%
- CO	23	ppm
- NO_x	200	ppm
- SO_2	180	ppm
- HCT	2	ppm
GAZ ACIDES		
- HCl	360	ppm
COMPOSÉS ORGANIQUES*		
- DDPC	53	ng/m^3N
- DFPC	114	ng/m^3N
- BPC	4280	ng/m^3N
- HAP	7090	ng/m^3N
- CB	3300	ng/m^3N
- CP	9490	ng/m^3N
PARTICULES*	26	mg/m^3N
MÉTAUX*		
- Cd	26	ug/m^3N
- Pb	980	ug/m^3N
- Cr	11	ug/m^3N
- Ni	9	ug/m^3N
- Hg	780	ug/m^3N
- Sb	33	ug/m^3N
- As	2	ug/m^3N
- Cu	39	ug/m^3N
- Zn	1630	ug/m^3N

* Teneur rapportée à 12 % de CO_2.

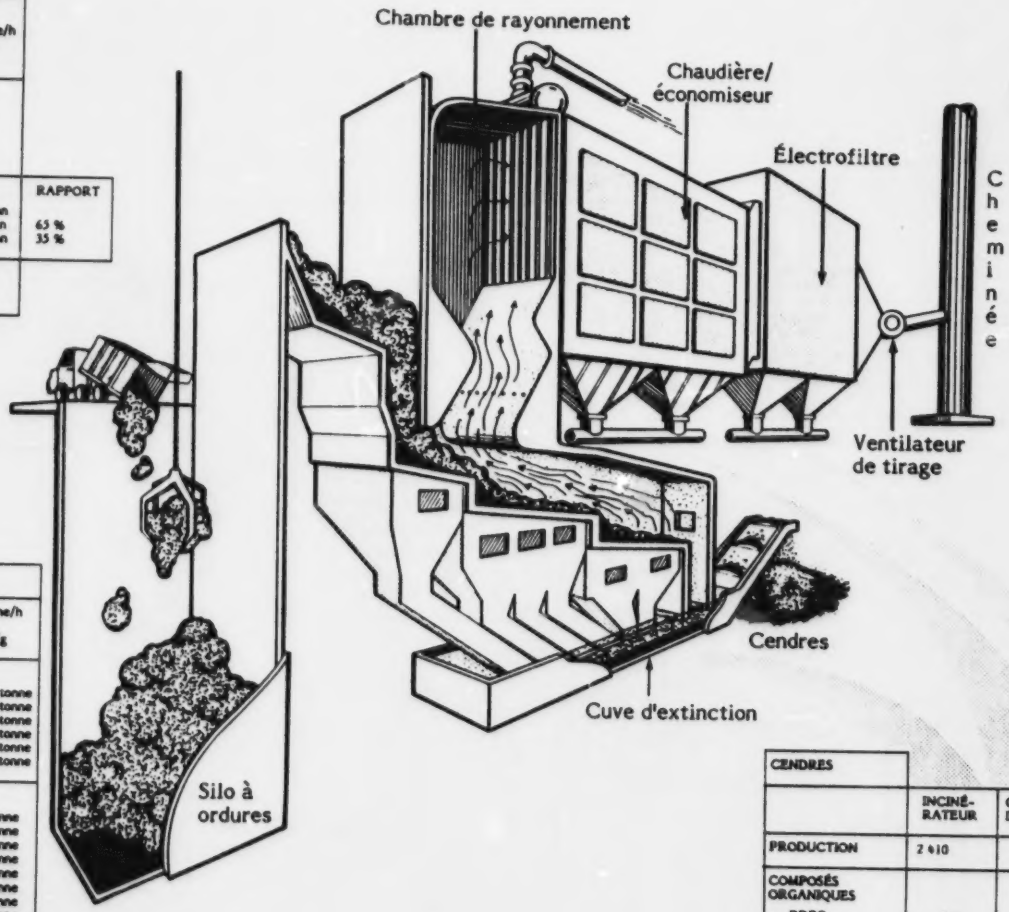
ORDURES		
RYTHME D'ENFOURNEMENT	6,5	tonne/h
HUMIDITÉ	37	%
POUVOIR CALORIFIQUE	2910	cal/g
COMPOSÉS ORGANIQUES		
- DDPC	7,8	mg/tonne
- DFPC	ND	mg/tonne
- BPC	55	mg/tonne
- HAP	4720	mg/tonne
- CB	22	mg/tonne
- CP	610	mg/tonne
MÉTAUX		
- Cd	2,9	g/tonne
- Pb	120	g/tonne
- Cr	53	g/tonne
- Ni	23	g/tonne
- Hg	0,56	g/tonne
- Sb	2,9	g/tonne
- As	1,0	g/tonne
- Cu	390	g/tonne
- Zn	190	g/tonne

CENDRES	INCINÉRATEUR	CHAUDIÈRE	ÉLECTROFILTRE	
PRODUCTION	1 650	33	45	kg/h
COMPOSÉS ORGANIQUES				
- DDPC	0,11	140	760	ng/g
- DFPC	0,12	120	220	ng/g
- BPC	ND	ND	5	ng/g
- HAP	150	70	100	ng/g
- CB	16	1 570	960	ng/g
- CP	10	110	1 240	ng/g
MÉTAUX				
- Cd	3,4	290	880	ug/g
- Pb	770	9 300	20 700	ug/g
- Cr	230	330	650	ug/g
- Ni	100	110	100	ug/g
- Hg	0,003	8,3	49	ug/g
- Sb	12	340	550	ug/g
- As	7,7	83	130	ug/g
- Cu	1 770	640	1 320	ug/g
- Zn	2 310	17 600	60 900	ug/g

Remarques: ND signifie non décelé.
m^3N = mètre cube normal.

FIGURE 5.2 RÉSUMÉ DES ESSAIS DE PERFORMANCE EP02/10/11 - BONNES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT, RYTHME D'ENFOURNEMENT LENT

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT			
VAPEUR			
- Débit	28	tonne/h	
- Pression	4300	kPa	
- Température	320	°C	
TEMPÉRATURES			
- Bas incinérateur	1010	°C	
- Haut incinérateur	780	°C	
- Entrée chaudière	810	°C	
- Air combustion	34	°C	
DÉBIT D'AIR			RAPPORT
- Combustion	550	m^3/mn	
- Primaire	360	m^3 mn	65 %
- Secondaire	190	m^3/mn	35 %
RENDEMENT			
- Charge/émissions	63,7	%	



ÉMISSIONS À LA CHEMINÉE		
GAZ		
- Débit	880	m^3N/mn
- Température	210	°C
- Humidité	15,7	%
- Opacité	33,3	%
DONNÉES OBTENUES EN CONTINU		
- O_2	9	%
- CO_2	10	%
- CO	28	ppm
- NO_x	180	ppm
- SO_2	200	ppm
- HCl	2	ppm
GAZ ACIDES		
- HCl	650	ppm
COMPOSÉS ORGANIQUES*		
- DDPC	19	ng/m^3N
- DFPC	44	ng/m^3N
- BPC	3020	ng/m^3N
- HAP	4030	ng/m^3N
- CB	3300	ng/m^3N
- CP	5080	ng/m^3N
PARTICULES*	22	mg/m^3N
MÉTAUX*		
- Cd	24	ug/m^3N
- Pb	670	ug/m^3N
- Cr	7	ug/m^3N
- Ni	5	ug/m^3N
- Hg	700	ug/m^3N
- Sb	36	ug/m^3N
- As	3	ug/m^3N
- Cu	33	ug/m^3N
- Zn	1130	ug/m^3N

* Teneur rapportée à 12 % de CO_2.

ORDURES		
RYTHME D'ENFOURNEMENT	8,9	tonne/h
HUMIDITÉ	35	%
POUVOIR CALORIFIQUE	2860	cal/g
COMPOSÉS ORGANIQUES		
- DDPC	32	mg/tonne
- DFPC	3,2	mg/tonne
- BPC	45	mg/tonne
- HAP	1660	mg/tonne
- CB	72	mg/tonne
- CP	1570	mg/tonne
MÉTAUX		
- Cd	4,0	g/tonne
- Pb	660	g/tonne
- Cr	200	g/tonne
- Ni	27	g/tonne
- Hg	0,62	g/tonne
- Sb	2,2	g/tonne
- As	1,3	g/tonne
- Cu	250	g/tonne
- Zn	220	g/tonne

CENDRES				
	INCINÉ-RATEUR	CHAU-DIÈRE	ÉLECTRO-FILTRE	
PRODUCTION	2 610	34	57	kg/h
COMPOSÉS ORGANIQUES				
- DDPC	0,2	37	580	ng/g
- DFPC	1,0	31	190	ng/g
- BPC	ND	ND	ND	ng/g
- HAP	540	25	110	ng/g
- CB	45	360	890	ng/g
- CP	16	80	1 820	ng/g
MÉTAUX				
- Cd	4	210	1 060	ug/g
- Pb	1 760	7 480	21 100	ug/g
- Cr	250	300	480	ug/g
- Ni	130	120	110	ug/g
- Hg	0,03	7	72	ug/g
- Sb	16	330	750	ug/g
- As	7	91	170	ug/g
- Cu	2 540	530	1 480	ug/g
- Zn	1 780	17 400	60 700	ug/g

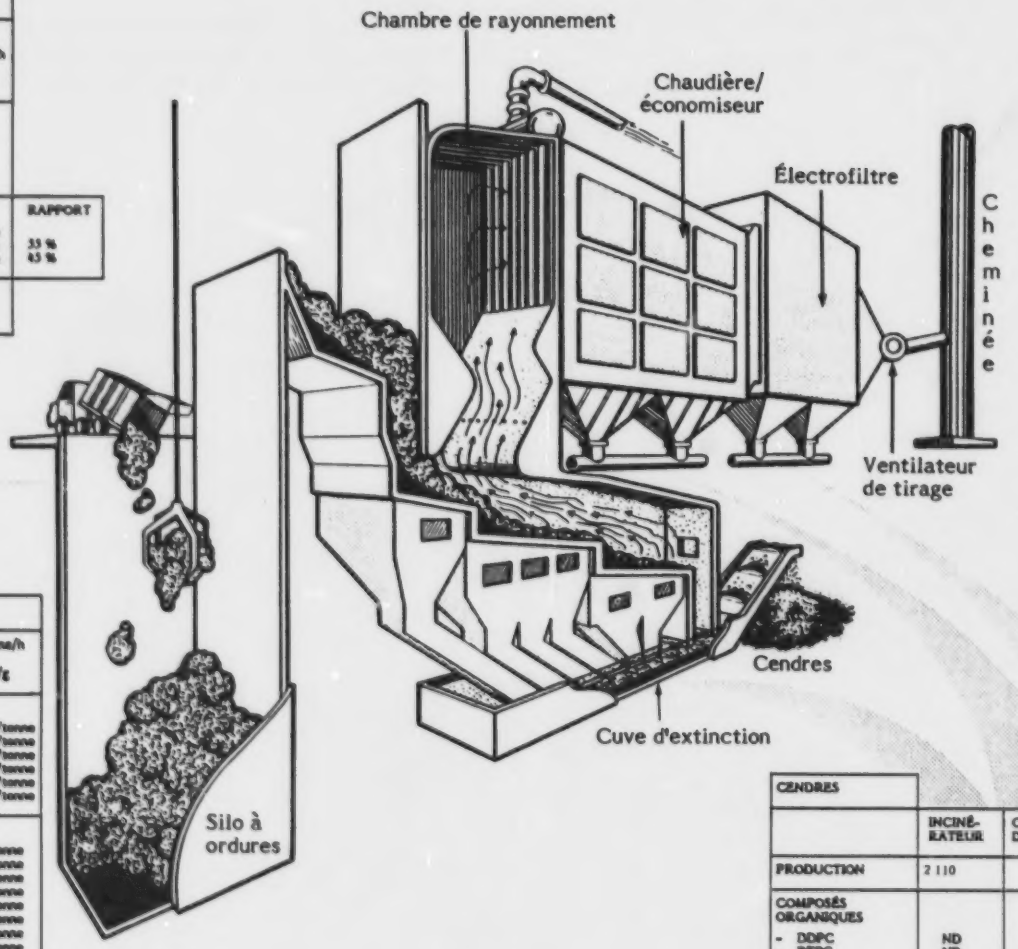
Remarques: ND signifie non décelé.
m^3N = mètre cube normal.

FIGURE 5.3 RÉSUMÉ DES ESSAIS DE PERFORMANCE EP05/06/12 - BONNES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT, RYTHME D'ENFOURNEMENT NOMINAL

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT		
VAPEUR		
- Débit	31,8	tonne/h
- Pression	4400	kPa
- Température	320	°C
TEMPÉRATURES		
- Bas incinérateur	1040	°C
- Haut incinérateur	820	°C
- Entrée chaudière	820	°C
- Air combustion	28	°C

DÉBIT D'AIR			RAPPORT
- Combustion	690	m^3/mn	
- Primaire	380	m^3/mn	55 %
- Secondaire	310	m^3/mn	45 %

RENDEMENT		
- Charge/émission	66,2	%



ÉMISSIONS À LA CHEMINÉE		
GAZ		
- Débit	965	m^3N/mn
- Température	226	°C
- Humidité	14,9	%
- Opacité	33	%
DONNÉES OBTENUES EN CONTINU		
- O_2	10	%
- CO_2	10	%
- CO	43	ppm
- NO_x	190	ppm
- SO_2	160	ppm
- HCl	2	ppm
GAZ ACIDES		
- HCl	440	ppm
COMPOSÉS ORGANIQUES*		
- DDPC	33	ng/m^3N
- DFPC	100	ng/m^3N
- BPC	4840	ng/m^3N
- HAP	3380	ng/m^3N
- CB	4320	ng/m^3N
- CP	7990	ng/m^3N
PARTICULES*	36	mg/m^3N
MÉTAUX*		
- Cd	41	ug/m^3N
- Pb	1600	ug/m^3N
- Cr	13	ug/m^3N
- Ni	8	ug/m^3N
- Hg	870	ug/m^3N
- Sb	44	ug/m^3N
- As	3	ug/m^3N
- Cu	34	ug/m^3N
- Zn	2040	ug/m^3N

* Teneur rapportée à 12 % de CO_2.

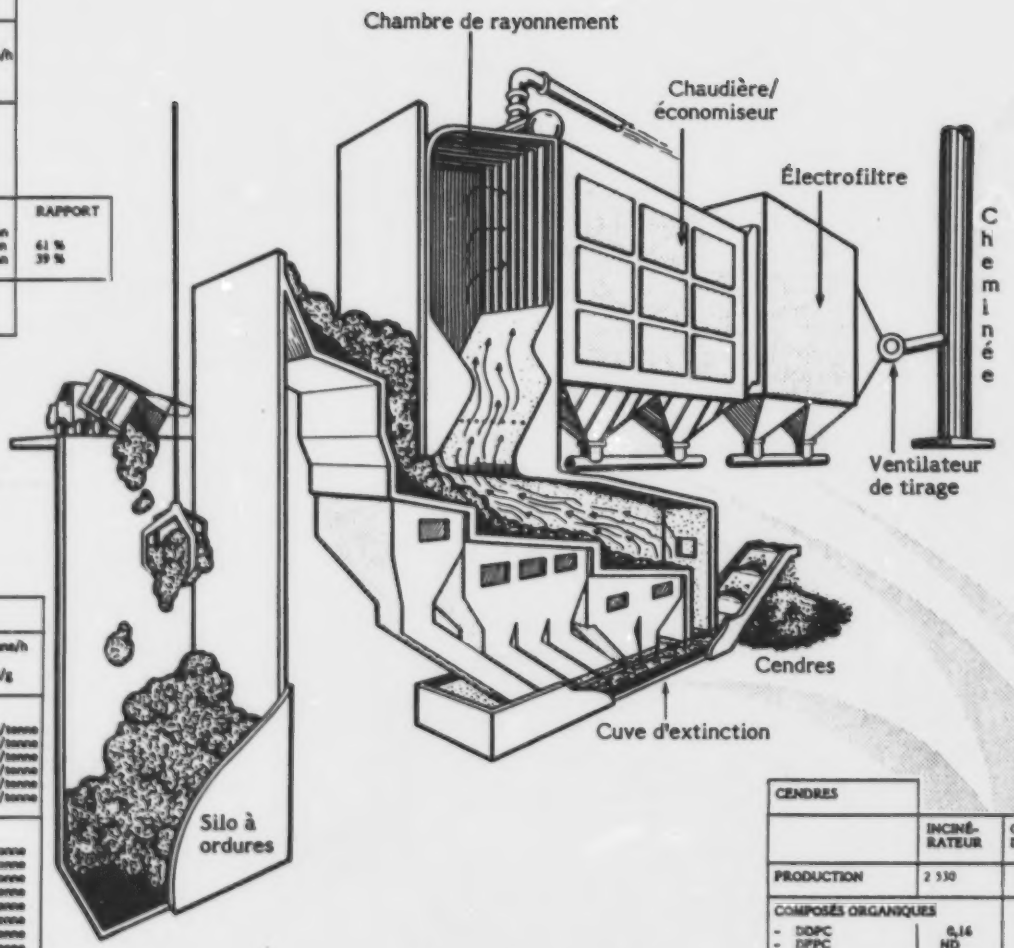
ORDURES		
RYTHME D'ENFOURNEMENT	9,7	tonne/h
HUMIDITÉ	35	%
POUVOIR CALORIFIQUE	2 890	cal/g
COMPOSÉS ORGANIQUES		
- DDPC	13	mg/tonne
- DFPC	0,05	mg/tonne
- BPC	69	mg/tonne
- HAP	10 480	mg/tonne
- CB	23	mg/tonne
- CP	2 060	mg/tonne
MÉTAUX		
- Cd	4,7	g/tonne
- Pb	200	g/tonne
- Cr	60	g/tonne
- Ni	19	g/tonne
- Hg	0,36	g/tonne
- Sb	5,4	g/tonne
- As	0,4	g/tonne
- Cu	48	g/tonne
- Zn	330	g/tonne

Remarques: ND signifie non décelé.
m^3N = mètre cube normal.

CENDRES	INCINÉRATEUR	CHAUDIÈRE	ÉLECTROFILTRE	
PRODUCTION	2 110	50	79	kg/h
COMPOSÉS ORGANIQUES				
- DDPC	ND	23	620	ng/g
- DFPC	ND	26	260	ng/g
- BPC	ND	ND	ND	ng/g
- HAP	500	21	100	ng/g
- CB	4	330	1 660	ng/g
- CP	20	100	1 700	ng/g
MÉTAUX				
- Cd	3	150	760	ug/g
- Pb	870	6 640	17 200	ug/g
- Cr	360	340	320	ug/g
- Ni	430	100	120	ug/g
- Hg	0,04	6	73	ug/g
- Sb	9	270	330	ug/g
- As	8	74	150	ug/g
- Cu	4 510	480	1 300	ug/g
- Zn	1 530	13 600	44 800	ug/g

FIGURE 5.4 RÉSUMÉ DES ESSAIS DE PERFORMANCE EP07/09 - BONNES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT, RYTHME D'ENFOURNEMENT RAPIDE

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT			
VAPEUR			
- Débit	28	tonne/h	
- Pression	4300	kPa	
- Température	320	°C	
TEMPÉRATURES			
- Bas incinérateur	860	°C	
- Haut incinérateur	660	°C	
- Entrée chaudière	710	°C	
- Air combustion	34	°C	
DÉBIT D'AIR			RAPPORT
- Combustion	940	m^3/mn	
- Primaire	570	m^3/mn	61 %
- Secondaire	370	m^3/mn	39 %
RENDEMENT			
- Charge/émissions	60,1	%	



ÉMISSIONS À LA CHEMINÉE		
GAZ		
- Débit	1 160	m^3N/mn
- Température	230	°C
- Humidité	13,6	%
- Opacité	35	%
DONNÉES OBTENUES EN CONTINU		
- O_2	12	%
- CO_2	6	%
- CO	78	ppm
- NO_x	260	ppm
- SO_2	130	ppm
- HCl	2	ppm
GAZ ACIDES		
- HCl	450	ppm
COMPOSÉS ORGANIQUES*		
- DDPC	300	ng/m^3N
- DFPC	300	ng/m^3N
- BPC	7 000	ng/m^3N
- HAP	21 800	ng/m^3N
- CB	9 920	ng/m^3N
- CP	22 300	ng/m^3N
PARTICULES*	35	mg/m^3N
MÉTAUX*		
- Cd	90	$\mu g/m^3N$
- Pb	2 040	$\mu g/m^3N$
- Cr	21	$\mu g/m^3N$
- Ni	8	$\mu g/m^3N$
- Hg	810	$\mu g/m^3N$
- Sb	112	$\mu g/m^3N$
- As	6	$\mu g/m^3N$
- Cu	91	$\mu g/m^3N$
- Zn	5 120	$\mu g/m^3N$

* Teneur rapportée à 12 % de CO_2.

ORDURES		
RYTHME D'ENFOURNEMENT	9,3	tonne/h
HUMIDITÉ	34	%
POUVOIR CALORIFIQUE	2820	cal/g
COMPOSÉS ORGANIQUES		
- DDPC	47	mg/tonne
- DFPC	6,1	mg/tonne
- BPC	120	mg/tonne
- HAP	1730	mg/tonne
- CB	93	mg/tonne
- CP	1830	mg/tonne
MÉTAUX		
- Cd	5,9	g/tonne
- Pb	760	g/tonne
- Cr	89	g/tonne
- Ni	24	g/tonne
- Hg	1,1	g/tonne
- Sb	63	g/tonne
- As	1,6	g/tonne
- Cu	43	g/tonne
- Zn	190	g/tonne

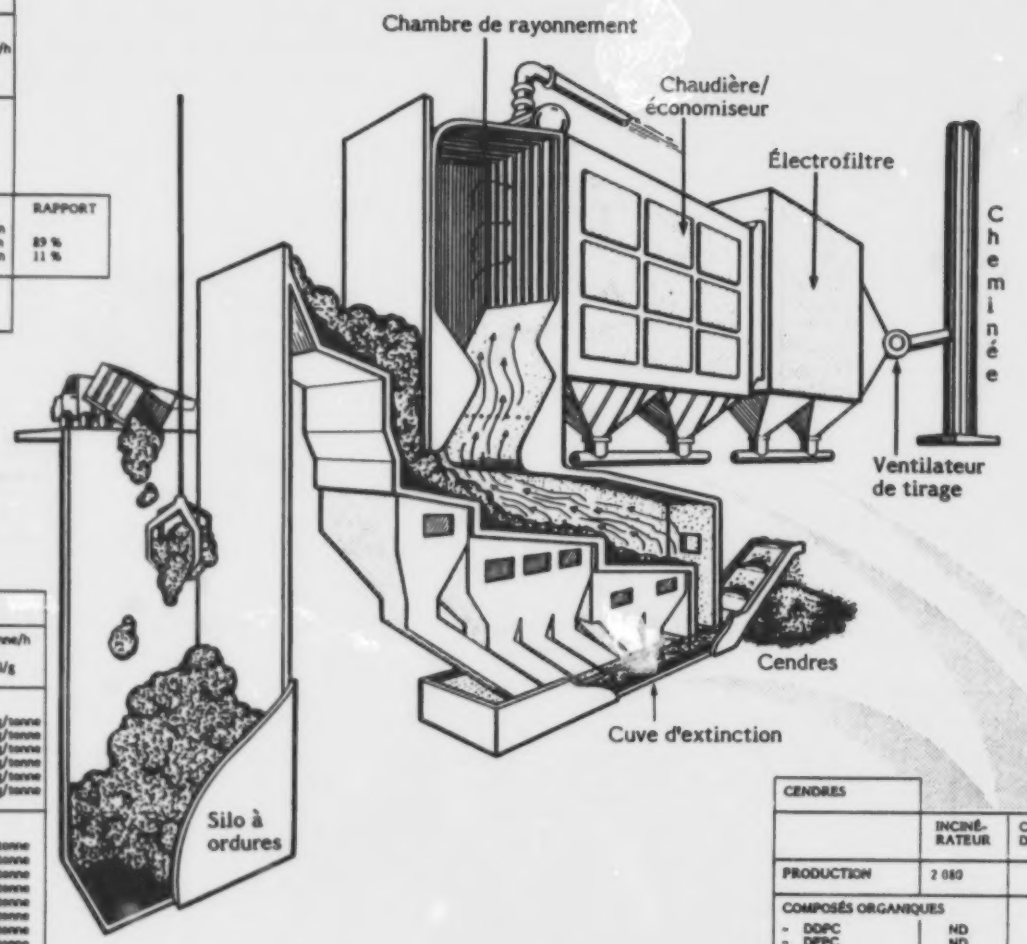
CENDRES				
	INCINÉRATEUR	CHAUDIÈRE	ÉLECTROFILTRE	
PRODUCTION	2 530	34	130	kg/h
COMPOSÉS ORGANIQUES				
- DDPC	0,16	63	600	ng/g
- DFPC	ND	25	230	ng/g
- BPC	ND	ND	12	ng/g
- HAP	140	33	120	ng/g
- CB	3	310	1 380	ng/g
- CP	ND	68	1 290	ng/g
MÉTAUX				
- Cd	4	140	510	µg/g
- Pb	1 320	5 510	10 800	µg/g
- Cr	230	320	550	µg/g
- Ni	90	110	98	µg/g
- Hg	0,009	4	32	µg/g
- Sb	26	96	730	µg/g
- As	7	63	67	µg/g
- Cu	2 240	340	950	µg/g
- Zn	2 550	11 100	33 800	µg/g

Remarques: ND signifie non décelé.
m^3N = mètre cube normal.

FIGURE 5.5 RÉSUMÉ DES ESSAIS DE PERFORMANCE EP03/04 - CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT MÉDIOCRES, RYTHME D'ENFOURNEMENT NOMINAL, BASSE TEMPÉRATURE

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT			
VAPEUR			
- Débit	28	tonne/h	
- Pression	4300	kPa	
- Température	320	°C	
TEMPÉRATURES			
- Bas incinérateur	980	°C	
- Haut incinérateur	730	°C	
- Entrée chaudière	750	°C	
- Air combustion	32	°C	
DÉBIT D'AIR			RAPPORT
- Combustion	550	m^3/mn	
- Primaire	490	m^3/mn	89 %
- Secondaire	60	m^3/mn	11 %
RENDEMENT			
- Charge/émissions	63,3	%	

ORDURES		
RYTHME D'ENFOURNEMENT	8,7	tonne/h
HUMIDITÉ	33,2	%
POUVOIR CALORIFIQUE	2980	cal/g
COMPOSÉS ORGANIQUES		
- DDPC	23	mg/tonne
- DFPC	1,0	mg/tonne
- BPC	77	mg/tonne
- HAP	2810	mg/tonne
- CB	25	mg/tonne
- CP	800	mg/tonne
MÉTAUX		
- Cd	2,0	g/tonne
- Pb	380	g/tonne
- Cr	51	g/tonne
- Ni	28	g/tonne
- Hg	0,95	g/tonne
- Sb	9	g/tonne
- As	1,4	g/tonne
- Cu	600	g/tonne
- Zn	280	g/tonne



ÉMISSIONS À LA CHEMINÉE		
GAZ		
- Débit	1 050	m^3N/mn
- Température	230	°C
- Humidité	13,3	%
- Opacité	35	%
DONNÉES OBTENUES EN CONTINU		
- O_2	11	%
- CO_2	9	%
- CO	160	ppm
- NO_x	190	ppm
- SO_2	160	ppm
- HCl	3	ppm
GAZ ACIDES		
- HCl	520	ppm
COMPOSÉS ORGANIQUES*		
- DDPC	220	ng/m^3N
- DFPC	310	ng/m^3N
- BPC	1 630	ng/m^3N
- HAP	3 150	ng/m^3N
- CB	9 520	ng/m^3N
- CP	23 700	ng/m^3N
PARTICULES*	42	mg/m^3N
MÉTAUX*		
- Cd	76	$\mu g/m^3N$
- Pb	2 300	$\mu g/m^3N$
- Cr	14	$\mu g/m^3N$
- Ni	7	$\mu g/m^3N$
- Hg	630	$\mu g/m^3N$
- Sb	86	$\mu g/m^3N$
- As	6	$\mu g/m^3N$
- Cu	89	$\mu g/m^3N$
- Zn	3 430	$\mu g/m^3N$

* Teneur rapportée à 12 % de CO_2.

CENDRES				
	INCINÉRATEUR	CHAUDIÈRE	ÉLECTROFILTRE	
PRODUCTION	2 080	50	116	kg/h
COMPOSÉS ORGANIQUES				
- DDPC	ND	51	930	ng/g
- DFPC	ND	17	260	ng/g
- BPC	ND	ND	29	ng/g
- HAP	320	69	330	ng/g
- CB	4	259	1 320	ng/g
- CP	11	59	2 970	ng/g
MÉTAUX				
- Cd	4	210	480	µg/g
- Pb	1 640	8 660	11 800	µg/g
- Cr	170	260	350	µg/g
- Ni	72	110	110	µg/g
- Hg	0,004	3	41	µg/g
- Sb	10	260	330	µg/g
- As	8	34	46	µg/g
- Cu	1 310	330	930	µg/g
- Zn	1 170	12 800	27 300	µg/g

Remarques: ND signifie non décelé.
m^3N = mètre cube normal.

FIGURE 5.6 RÉSUMÉ DES ESSAIS DE PERFORMANCE EP14/15 - CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT MÉDIOCRES, RYTHME D'ENFOURNEMENT NOMINAL, MAUVAISE DISTRIBUTION DE L'AIR

TABLEAU 5.3 PRINCIPAUX PARAMÈTRES AJUSTÉS POUR LES ESSAIS DE PERFORMANCE

	Bonnes conditions/ rythme d'enfournement			Conditions médiocres/ rythme d'enfournement nominal	
Paramètre	Lent	Nominal	Rapide	Basse température	Mauvaise distribution de l'air
Production de vapeur (t/h)	20,0	28,0	31,8	28,0	28,4
Air primaire (% du total)	58	65	55	61	89
Air secondaire (% du total)	42	35	45	39	11
Température dans la chambre de rayonnement (°C)	864	1012	1046	859	978
Température à l'entrée de la chaudière (°C)	696	805	823	712	754
Excès d'air (%)	140	78	84	130	113
Rendement énergétique (%)	61,6	63,7	66,2	60,1	63,3
Rapport débit de vapeur (kg de vapeur/ kg d'ordures)	3,1	3,1	3,3	3,0	3,3
Débit des gaz de carneau (m^3N/mn)	886	875	965	1143	1051

l'effet de la température et de la distribution de l'air (rapport air primaire/air secondaire) sur les émissions. Pour les quatre essais conduits dans ces conditions, on avait opté pour un excès d'air relativement élevé (130 p. 100 pour les essais EP03 et EP04, 113 p. 100 pour les essais EP14 et EP15). Dans tous les cas, les teneurs en monoxyde de carbone ont été

élevées (78 ppm et 163 ppm) comparativement aux 28 ppm enregistrées lors des essais conduits dans de bonnes conditions. Les essais EP03 et EP04 se caractérisaient par une basse température dans la chambre de rayonnement (859 °C) et représentaient de mauvaises conditions à basse température. Les essais EP14 et EP15 visaient à déterminer l'influence de la distribution de l'air de combustion, soit du rapport air primaire/air secondaire. Lors de ces essais, un très fort pourcentage d'air était insufflé sous la grille de combustion; l'air secondaire ne représentait que 11 p. 100 de l'apport total d'air.

5.2.3 Production de vapeur faible et élevée. - Pour déterminer l'influence de la production de vapeur sur les émissions, on a choisi de conduire des essais dans de bonnes conditions mais avec une production élevée de vapeur (32 t/h) et une production faible (20 t/h) afin de comparer les résultats avec l'essai de référence (28 t/h). Les essais avec faible production de vapeur (20 t/h) se sont déroulés avec un bon rapport air primaire/air secondaire (58/42), une température relativement basse dans la chambre de rayonnement (864 °C), un fort excès d'air (140 p. 100), ainsi qu'une teneur moyenne en monoxyde de carbone relativement faible (24 ppm). La température plus basse et le fort excès d'air qui caractérisaient ces essais par rapport à ceux réalisés à la valeur nominale de 28 t de vapeur par heure, reproduisent un bon fonctionnement de l'incinérateur lorsque la production de vapeur est faible.

Les conditions retenues pour les essais avec production de vapeur élevée (32 t/h) étaient: bon rapport air primaire/air secondaire (55/45), température dans la chambre de rayonnement relativement élevée (1046 °C), faible excès d'air (84 %), et faible teneur moyenne en monoxyde de carbone (43 ppm). Ces conditions reproduisent un bon fonctionnement de l'incinérateur à un débit de vapeur plus élevé que les valeurs nominales.

5.3 Données continues sur les gaz

Le tableau 5.4 résume les résultats de l'analyse en continu des gaz. Le groupe d'essais pour lequel on a enregistré la plus faible teneur en monoxyde de carbone (24 ppm) se caractérise par une faible production de vapeur alors que la valeur la plus élevée (163 ppm) a été observée au cours des essais avec mauvaise distribution d'air. Ordinairement, des teneurs en monoxyde de carbone inférieures à 250 ppm indiquent que la combustion s'opère raisonnablement bien, mais il est normal d'atteindre des teneurs moyennes en monoxyde de carbone de 50 ppm dans les installations modernes. C'est seulement dans les conditions d'opération où la distribution de l'air était mauvaise que l'on a observé des teneurs moyennes relativement élevées en monoxyde de carbone (c.-à-d.

TABLEAU 5.4 RÉSULTATS DE L'ANALYSE EN CONTINU DES GAZ LORS DES ESSAIS DE PERFORMANCE (moyenne de groupe)

	Bonnes conditions/ rythme d'enfournement			Conditions médiocres/ rythme d'enfournement nominal	
	Lent	Nominal	Rapide	Basse température	Mauvaise distribution de l'air
Monoxyde de carbone (ppm)	23,5	27,9	43	78,0	163,4
Hydrocarbures totaux					
à froid (ppm)	2,3	1,8	1,7	2,1	3,1
à chaud (ppm)	5,1	s.o.	s.o.	4,3	s.o.
Oxydes d'azote (ppm)	205	180	194	235	187
Chlorure d'hydrogène (ppm)	499	452	441	s.o.	521
Oxydes de soufre (ppm)	181	196	160	153	157
Opacité (%)	29	33	32	35	35

Remarque: Valeurs rapportées à 12 p. 100 de dioxyde de carbone.
s.o.: Sans objet.

supérieures à 50 ppm). Lorsque l'on a établi les diverses conditions dans lesquelles les essais se dérouleraient, le monoxyde de carbone figurait parmi les principaux indicateurs permettant de juger si le fonctionnement était efficace ou non, autant pour le court terme que sur la base d'une moyenne pour l'essai.

Les **hydrocarbures totaux** présentaient peu de variations d'un groupe d'essais à l'autre avec des teneurs généralement comprises entre 2 et 5 ppm. Dans les installations modernes, les teneurs devraient être inférieures à 50 ppm; des valeurs inférieures à 10 ppm sont maintenant considérées normales.

Les moyennes de groupe obtenues pour les **oxydes d'azote** et les **oxydes de soufre** présentaient peu de variations d'un mode d'essai à l'autre, comme prévu. L'écart entre la teneur moyenne de groupe la plus élevée et la moins élevée (235 ppm et 180 ppm pour les NO_x, 196 ppm et 153 ppm pour le SO_2) était d'environ 30 p. 100.

Pour le **chlorure d'hydrogène**, les moyennes de groupe mesurées en continu par la sonde à chlorure d'hydrogène étaient cohérentes d'un groupe d'essais à l'autre. La moyenne maximum de groupe (521 ppm) était de 18 p. 100 supérieure à la moyenne minimum (452 ppm). On constate par contre une variation plus significative d'un essai à un autre (teneurs s'échelonnant entre 366 ppm et 594 ppm). Les émissions de chlorure d'hydrogène correspondaient à celles normalement enregistrées dans les installations municipales d'incinération de déchets solides non équipées d'un dispositif d'épuration du chlorure d'hydrogène.

L'efficacité de l'opacimètre a été mise en doute étant donné que les lectures d'**opacité** ne correspondaient pas vraiment aux teneurs en particules.

5.4 Émissions de composés organiques en traces

Les gaz de carneau ont été échantillonnés au moyen de montages pour le dosage des composés organiques en traces. Les résultats des analyses sont résumés dans le tableau 5.5 et sont repris plus en détail par après.

TABLEAU 5.5 ÉMISSIONS DE COMPOSÉS ORGANIQUES EN TRACES LORS DES ESSAIS DE PERFORMANCE

	Bonnes conditions/ rythme d'enfournement			Conditions médiocres/ rythme d'enfournement nominal	
Composé organique	Lent	Nominal	Rapide	Basse température	Mauvaise distribution de l'air
Dioxines (ng/m^3N)	52,6	18,8	55,4	298,5	218,9
Furannes (ng/m^3N)	114,5	44,5	100,7	298,3	306,4
Chlorophénols ($\mu g/m^3N$)	9,5	5,1	8,0	22,5	23,7
HAP ($\mu g/m^3N$)	7,1	4,0	5,4	21,9	3,2
Chlorobenzènes ($\mu g/m^3N$)	3,5	3,3	4,4	9,9	9,5
BPC ($\mu g/m^3N$)	4,3	3,0	4,9	7,0	1,7

Remarque: Valeurs rapportées à 12 p. 100 de dioxyde de carbone.

5.4.1 Dioxines et furannes. - Les données sur les essais effectués avant que le four ne soit modifié constituent une excellente référence pour évaluer les effets des améliorations apportées. En 1984, Environnement Québec a effectué un échantillonnage en cheminée pour mesurer les émissions de dioxines et de furannes par l'installation d'incinération de la CUQ. Trois essais ont été menés à bien et à chaque fois on a constaté des teneurs relativement élevées en dioxines et en furannes (800 à 4000 ng/m^{3}N), ce qui est fréquent pour des installations de cet âge. Comme le montre la figure 5.7, les émissions de dioxines ont considérablement chuté après les modifications apportées en 1986. En employant de bonnes pratiques d'exploitation, les teneurs en dioxines ont été entre quarante et cent fois moindres par rapport aux résultats de 1984. Fait important à noter, dans de mauvaises conditions de fonctionnement, les émissions de dioxines étaient malgré tout dix fois inférieures à celles enregistrées par Environnement Québec. En dépit des améliorations, de bonnes pratiques d'exploitation sont donc essentielles pour minimiser la formation et les émissions de dioxines.

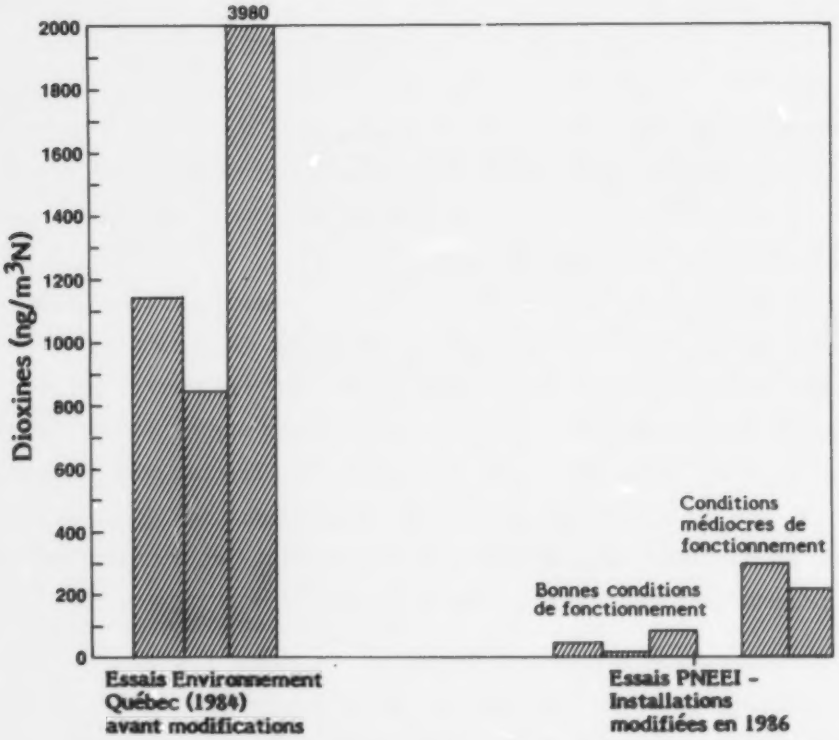


FIGURE 5.7 COMPARAISON DES ÉMISSIONS DE DIOXINES

La réduction de la production de dioxines et de particules était du même ordre, ce qui suggère que les deux sont reliées. La théorie actuelle voulant que les dioxines sont surtout liées aux particules présentes dans les gaz de combustion laisse supposer que de bonnes conditions de combustion, qui réduisent l'entraînement des particules hors de la zone de combustion, permettront également de minimiser la formation de dioxines et partant, les émissions de dioxines. Cette relation est approfondie ci-dessous.

Les émissions totales de **dioxines** et de **furannes** du four modifié en 1986 étaient respectivement comprises entre 19 et 298 ng/m^{3}N et 44 à 306 ng/m^{3}N. Les plus faibles émissions de composés organiques en traces et de monoxyde de carbone ont été observées dans de bonnes conditions de fonctionnement, alors que les plus hautes teneurs en dioxines et en furannes correspondaient aux essais effectués dans l'une ou l'autre des conditions de fonctionnement jugées médiocres. On a fait le même constat pour les teneurs élevées en monoxyde de carbone. Les résultats obtenus pour les dioxines et les furannes démontrent clairement que les conditions de fonctionnement ont un effet significatif sur les émissions.

Les émissions de dioxines aux rythmes d'enfournement lent et rapide étaient du même ordre (52,6 et 55,4 ng/m^{3}N); au taux nominal et lors de bonnes conditions de fonctionnement, les émissions de dioxines sont même tombées à 18,8 ng/m^{3}N. Une tendance semblable a été observée en ce qui concerne la teneur en furannes des gaz de combustion. Les teneurs enregistrées aux rythmes d'enfournement lent et rapide étaient semblables (moyenne: 107,6 ng/m^{3}N); au rythme nominal, les teneurs enregistrées (44,5 ng/m^{3}N) avaient baissé de plus de moitié.

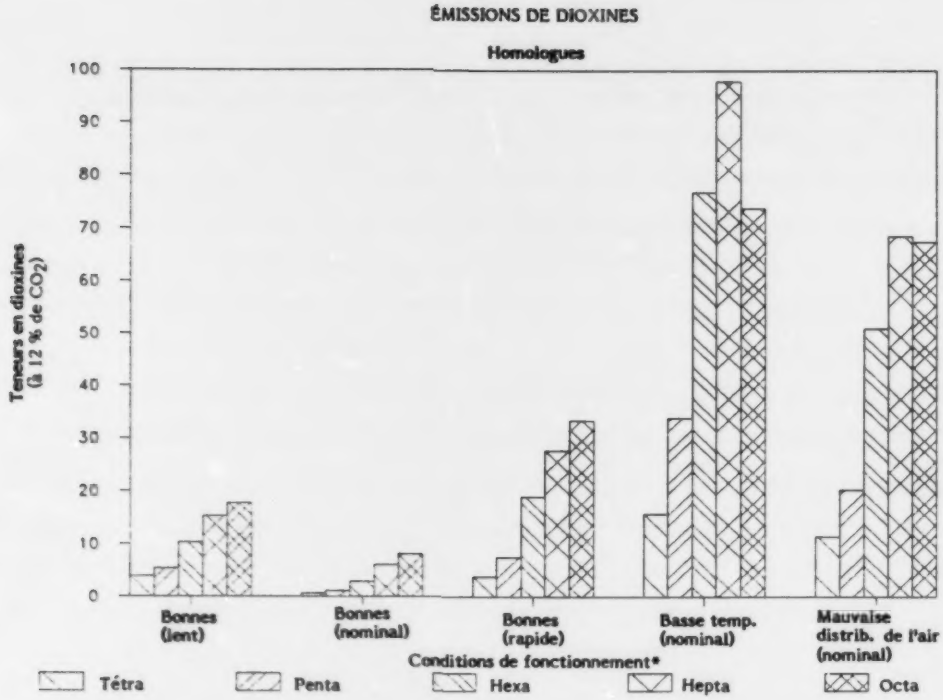
Le tableau 5.6 et la figure 5.8 résument les teneurs en homologues des dioxines et des furannes (valeurs moyennes de groupe). Le profil de répartition des homologues des dioxines dans toutes les conditions d'essai indique que les teneurs les plus faibles ont été observées pour les homologues tétra et que les teneurs augmentaient progressivement en allant vers le groupe octa. En revanche, on observe l'inverse pour les homologues du furanne, c.-à -d. que les teneurs les plus élevées s'appliquent aux groupes tétra et penta, et qu'elles vont en diminuant en allant vers le groupe octa. Ces résultats concordent avec ceux d'autres programmes d'essais rattachés au PNEEI.

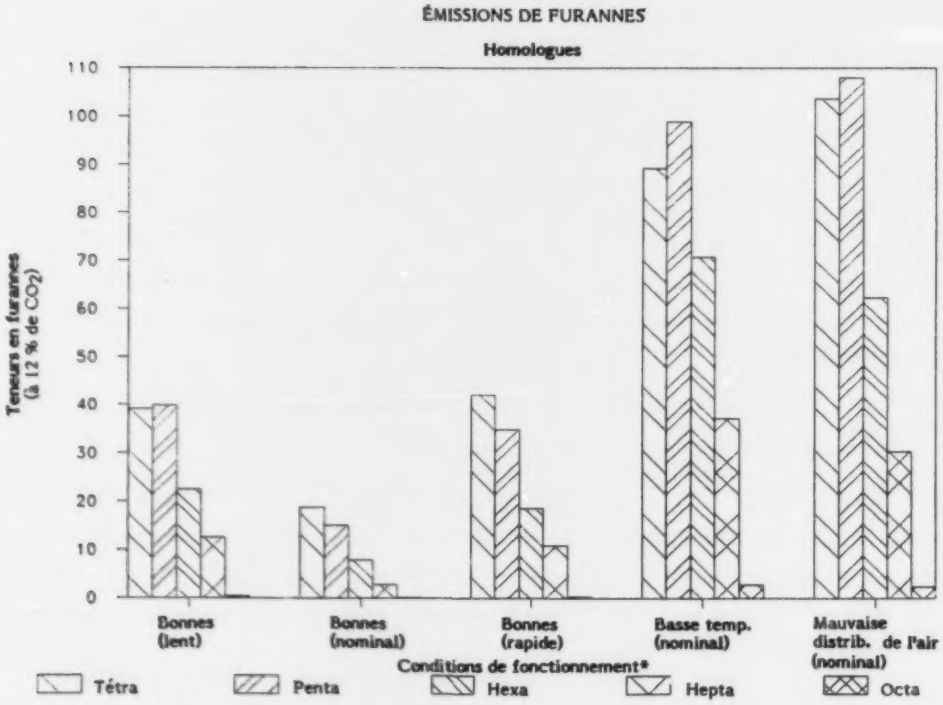
5.4.2 Autres composés organiques en traces. - Comme l'indique le tableau 5.5, les plus faibles teneurs en chlorophénols et en chlorobenzènes (5,1 et 3,3 µg/m^{3}N respectivement) ont été observées dans les essais conduits dans de bonnes conditions de

TABLEAU 5.6 TENEURS DES ÉMISSIONS EN HOMOLOGUES DES DIOXINES ET DES FURANNES LORS DES ESSAIS DE PERFORMANCE (ng/m^3N)

	Bonnes conditions/ rythme d'enfournement			Conditions médiocres/ rythme d'enfournement nominal	
Homologue	Lent	Nominal	Rapide	Basse température	Mauvaise distribution de l'air
Tétrachloro-dibenzodioxines	3,9	0,6*	3,8	15,8	1,5
Pentachloro-dibenzodioxines	5,4	1,1*	7,5	33,9	20,3
Hexachloro-dibenzodioxines	10,3	2,9*	19,0	77,0	51,1
Heptachloro-dibenzodioxines	15,2	6,1*	27,7	98,0	68,6
Octachloro-dibenzodioxines	17,7	8,1*	33,4	73,9	67,5
Total DDPC	52,6	18,8*	91,4	298,5	218,9
Tétrachloro-dibenzofurannes	39,1	18,7*	42,0	89,1	103,6
Pentachloro-dibenzofurannes	39,9	15,0*	34,9	98,9	108,0
Hexachloro-dibenzofurannes	22,5	7,8*	18,5	70,6	62,2
Heptachloro-dibenzofurannes	12,5	2,9*	10,9	37,1	30,2
Octachloro-dibenzofurannes	0,5	0,1*	0,4	2,8	2,4
Total DFPC	114,5	44,5*	106,6	298,3	306,4

* Plus faible valeur observée.





* Le rythme d'enfournement est indiqué entre parenthèses.

FIGURE 5.8 RÉPARTITION DES HOMOLOGUES DES DIOXINES ET DES FURANNES

fonctionnement au rythme d'enfournement nominal, alors que les plus élevées (24 µg/m^{3}N pour les chlorophénols et 10 µg/m^{3}N pour les chlorobenzènes) ont été enregistrées dans de mauvaises conditions de fonctionnement.

C'est lors des essais où la distribution de l'air était mauvaise que les émissions de BPC et de HAP ont été les plus faibles (3,2 et 1,7 µg/m^{3}N, respectivement); les plus élevées (9,9 et 21,9 µg/m^{3}N, respectivement), se rapportent aux essais faits à de basses températures.

Les données suivantes résument la plage observée entre les moyennes de groupe pour les composés organiques ci-dessous:

CP - Maximum égal à 4,6 fois le minimum.

CB - Maximum égal à 3,0 fois le minimum.

BPC - Maximum égal à 4,1 fois le minimum.

HAP - Maximum égal à 6,8 fois le minimum.

5.5 Émissions de particules et de métaux

Les données pour les émissions de particules et de métaux sont résumées dans le tableau 5.7.

Dans tous les essais, et particulièrement ceux conduits dans de bonnes conditions, les émissions de particules étaient relativement faibles. Dans les installations dotées d'électrofiltres à haut rendement, on peut habituellement s'attendre à des teneurs en particules comprises entre 20 et 70 mg/m^{3}N. Comme cela faisait onze ans que l'électrofiltre à deux champs était en service, nous nous attendions à des teneurs plus élevées. Il est probable que la modification du four a passablement diminué l'entraînement de particules. La plus faible moyenne de groupe (22 mg/m^{3}N) a été observée dans de bonnes conditions de fonctionnement au rythme d'enfournement nominal, et la plus forte teneur (62 mg/m^{3}N) a été enregistrée alors que la distribution de l'air était mauvaise.

L'effet des améliorations apportées au four sur les émissions de particules ressort nettement dans la figure 5.9, qui permet de comparer les émissions avant et après la modification du four, et à deux taux de production de vapeur. Dans les deux cas, on s'est servi d'échantillonneurs à grand débit. Les données antérieures à 1984 confirment également la réduction significative des émissions de particules avec le four modifié.

Comme le montre le tableau 5.7, et à l'instar des émissions de particules, c'est dans les mauvaises conditions de fonctionnement que les émissions de métaux (à l'exception du mercure et du nickel) ont été généralement les plus élevées alors que les plus faibles correspondaient à de bonnes conditions au rythme d'enfournement nominal.

TABLEAU 5.7 ÉMISSIONS DE PARTICULES ET DE MÉTAUX LORS DES ESSAIS DE PERFORMANCE (moyenne de groupe)

	Bonnes conditions/ rythme d'enfournement			Conditions médiocres/ rythme d'enfournement nominal	
	Lent	Nominal	Rapide	Basse température	Mauvaise distribution de l'air
Particules (mg/m^3N)	26	22	36	55	62
Granulométrie (taille inférieure à 2,5 µm) (%)	33	29	24	26	24
Cadmium ($\mu g/m^3N$)	26	24	41	90	76
Plomb ($\mu g/m^3N$)	978	673	1599	2039	2495
Chrome ($\mu g/m^3N$)	11	7	15	21	14
Nickel ($\mu g/m^3N$)	9	5	8	8	7
Mercure ($\mu g/m^3N$)	783	704	872	810	622
Antimoine ($\mu g/m^3N$)	35	36	44	112	87
Arsenic ($\mu g/m^3N$)	2	3	5	7	6
Cuivre ($\mu g/m^3N$)	39	33	54	91	89
Zinc ($\mu g/m^3N$)	1619	1130	2061	5122	3429

Remarque: Valeurs rapportées à 12 % de dioxyde de carbone.

Les émissions de plomb présentaient une bonne corrélation avec les conditions de fonctionnement. La plus forte moyenne de groupe a été observée au cours d'essais avec une mauvaise distribution de l'air, et elle était de 3,7 fois supérieure aux émissions les plus faibles enregistrées dans de bonnes conditions au rythme d'enfournement nominal. Des relations semblables ont été observées pour les autres métaux, excepté le mercure et le nickel.

Pour l'analyse granulométrique, les prélèvements ont été faits à la sortie de l'électrofiltre à un point d'échantillonnage où les gaz de combustion circulent à une vitesse moyenne. Un examen attentif des résultats a révélé que le mode de fonctionnement n'influençait pas vraiment la distribution granulométrique. Entre 11 et 40 p. 100 des

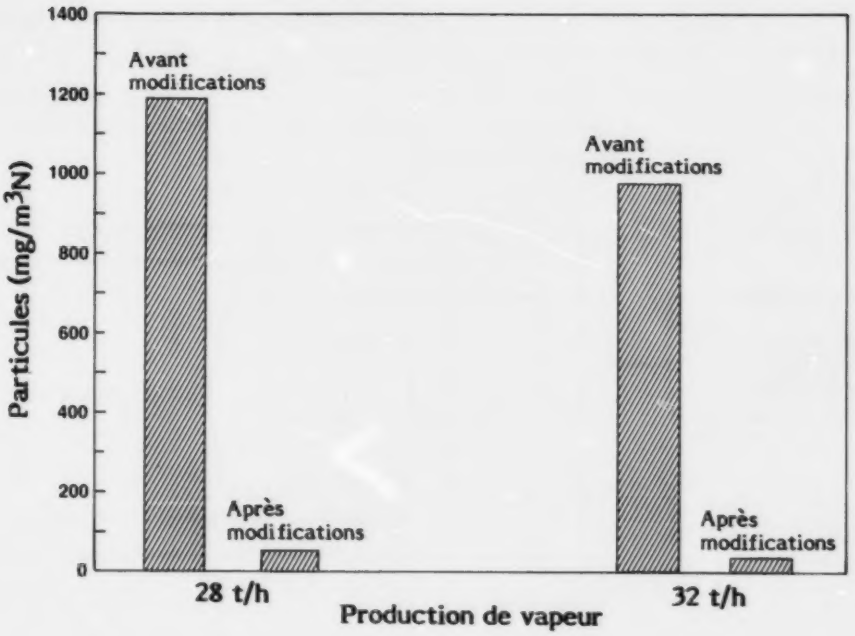


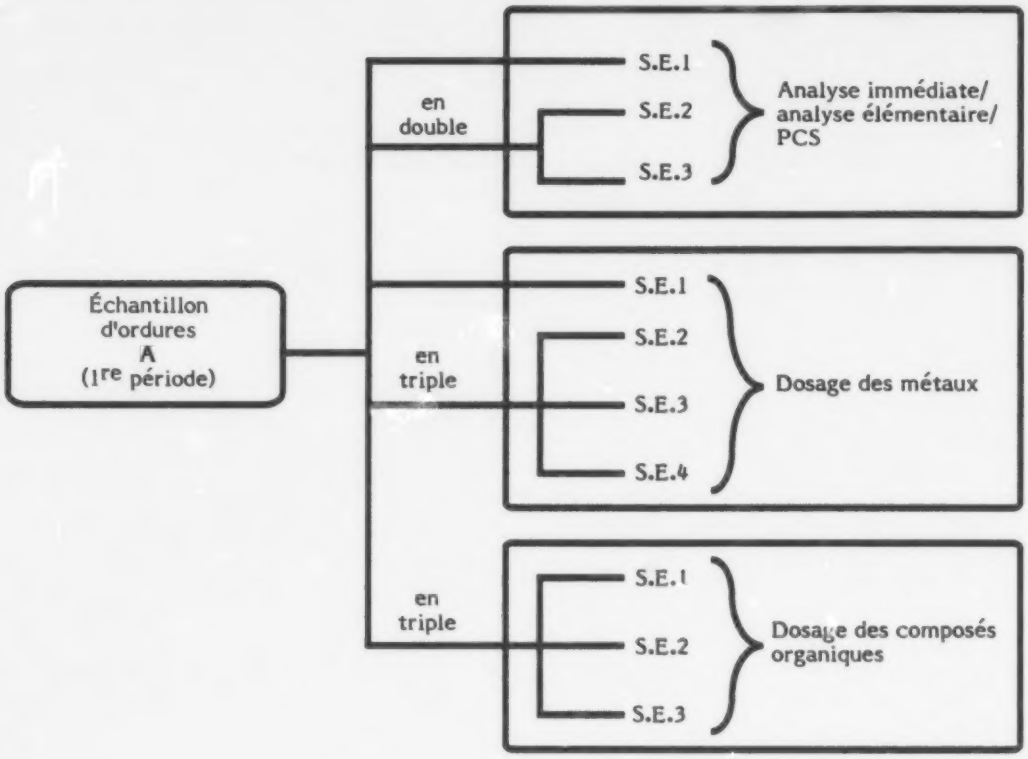
FIGURE 5.9 COMPARAISON DES ÉMISSIONS DE PARTICULES

particules étaient de taille inférieure à 2,5 µm, et entre 22 et 82 p. 100, de taille inférieure à 10 µm. En moyenne pour le programme d'essais, 28 p. 100 des particules étaient de taille inférieure à 2,5 µm, et 44 p. 100, de taille inférieure à 10 µm.

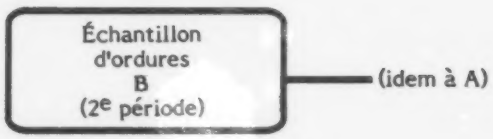
5.6 Analyse des ordures

Pour évaluer la variabilité dans la composition des ordures et la reproductibilité des analyses, des échantillons en triple ont été recueillis au cours de l'essai EP14. La durée d'échantillonnage a été divisée en trois périodes égales désignées par les lettres A, B et C dans la figure 5.10. On formait un tas distinct avec les ordures déchiquetées prélevées durant chaque période et on en extrayait cinq échantillons. Chaque échantillon était séché, traité, et subdivisé en dix sous-échantillons pour l'analyse immédiate, l'analyse élémentaire, la détermination du PCS (pouvoir calorifique supérieur), le dosage des métaux et des composés organiques en traces.

Le programme d'échantillonnage multiple a montré que la composition des ordures pour un échantillon donné était assez constante, donc que les sous-échantillons étaient homogènes et les analyses, bien reproductibles. Ces points sont illustrés par les données sur les composés organiques en traces du tableau 5.8. Par exemple, la teneur en dioxines des sous-échantillons S.E.1, S.E.2 et S.E.3 de l'échantillon A était comprise dans



S.E.: Sous-échantillon.



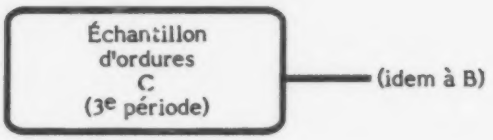


FIGURE 5.10 ÉCHANTILLONNAGE MULTIPLE DES ORDURES AU COURS DE L'ESSAI DE PERFORMANCE EP14

TABLEAU 5.8 TENEURS EN COMPOSÉS ORGANIQUES EN TRACES DES SOUS-ÉCHANTILLONS D'ORDURES (essai de performance EP14)

	Composés organiques en traces (ng/g)					
	DDPC	DFPC	CB	BPC	CP	HAP
Échantillon A						
S.E.1	17	0,04	29	141	1 097	3 942
S.E.2	28	0,04	22	93	911	4 000
S.E.3	21	0,04	27	45	1 033	3 525
Moyenne	22	0,04	26	93	1 014	3 822
Échantillon B						
S.E.1	147	9,38	87	100	5 670	9 686
S.E.2	245	10,71	111	84	6 704	10 377
S.E.3	188	9,99	96	62	4 880	6 551
Moyenne	193	10,03	98	82	5 751	8 858
Échantillon C						
S.E.1	7	0,04	108	26	436	2 883
S.E.2	9	0,10	75	8	334	3 036
S.E.3	11	0,05	92	14	538	3 227
Moyenne	9	0,06	92	16	436	3 049
Moyenne pour les 3 échantillons	75	3,38	72	64	2 400	5 243
Écart type	87	4,71	34	42	2 421	2 751

S.E.: Sous-échantillon.

une plage semblable (17 à 28 ng/g). Les plages des sous-échantillons de l'échantillon B (147 à 245 ng/g) et de l'échantillon C (7 à 11 ng/g) étaient aussi comparables.

L'échantillonnage multiple des ordures a également permis d'évaluer la composition des ordures sur une période prolongée étant donné que les trois échantillons ont été prélevés à des périodes différentes de l'essai. Si la composition des ordures était assez constante à l'intérieur d'un échantillon, elle variait par contre beaucoup d'un échantillon à l'autre. Par exemple, les teneurs moyennes en dioxines des échantillons A, B et C étaient de 22, 193 et 9 ng/g, respectivement. Ces résultats font ressortir l'importance de prélever de gros échantillons pour les analyses et de procéder à l'échantillonnage d'un bout à l'autre d'un essai.

Le lecteur trouvera dans les figures 5.2 à 5.6 des données additionnelles sur la composition des ordures (composés organiques, métaux, etc.).

5.7 Rendement thermique

Le rendement thermique permet de juger si la combustion se déroule bien ou mal. Pour évaluer le fonctionnement des installations de la CUQ, on a calculé le rendement thermique par la méthode de la bombe calorimétrique. Pour calculer le PCS des ordures, et partant le rendement thermique, on a considéré que l'incinérateur constituait une bombe calorimétrique. On a préféré cette méthode vu que la composition des ordures n'influence pas les résultats. Deuxièmement, la majeure partie des données utilisées pour les calculs a été obtenue de deux façons et on a vérifié si les données se recoupaient.

Le PCS des ordures calculé par la méthode de la bombe calorimétrique variait entre 11 074 et 13 149 kJ/kg (4761 à 5653 Btu/lb). Le rendement thermique calculé allait de 58 à 67 p. 100.

5.8 Stratification des températures dans la chambre de rayonnement

Les mesures de la température en divers endroits de la chambre de rayonnement (sur un plan horizontal) et sur un plan vertical à l'entrée de la chaudière de récupération de chaleur, ont permis de construire les courbes reliant les points de même température et d'établir les isothermes transversales. La moyenne des lectures de chaque thermocouple durant un essai donné a été utilisée pour établir la distribution de la température. Les tracés des figures 5.11 et 5.12 se rapportent à l'essai de caractérisation EC01.

Comme le montre la figure 5.11, les isothermes de température élevée étaient prédominantes près du déflecteur arrière. Le rapport air secondaire avant/arrière ne semblait pas avoir d'effets importants sur la distribution de la température; d'après les isothermes, il semblerait toutefois que la principale zone atteinte par les flammes se situerait près du déflecteur arrière étant donné qu'une zone de basse température a été identifiée près de la paroi avant.

La figure 5.12 montre un écart des températures entre la section supérieure et inférieure à l'entrée de la chaudière. Le temps de séjour plus prolongé des gaz de combustion dans la section supérieure explique que la température soit plus basse à cet endroit.

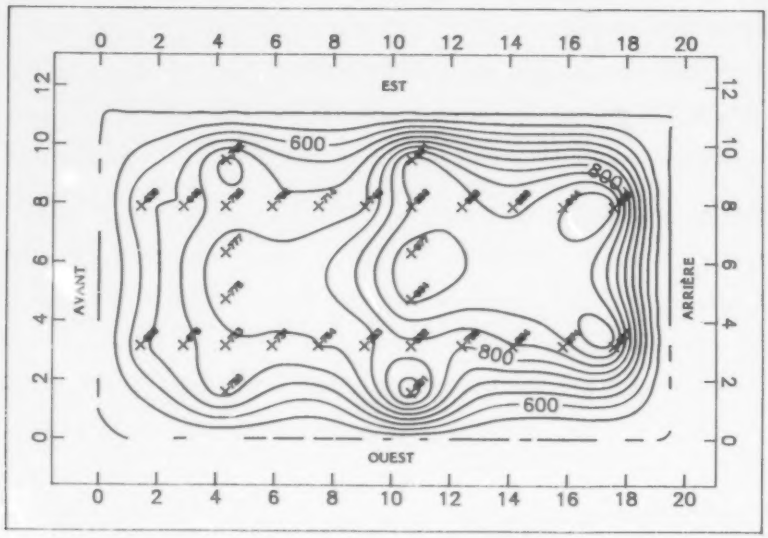


FIGURE 5.11 DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS LA CHAMBRE DE RAYONNEMENT (EC01)

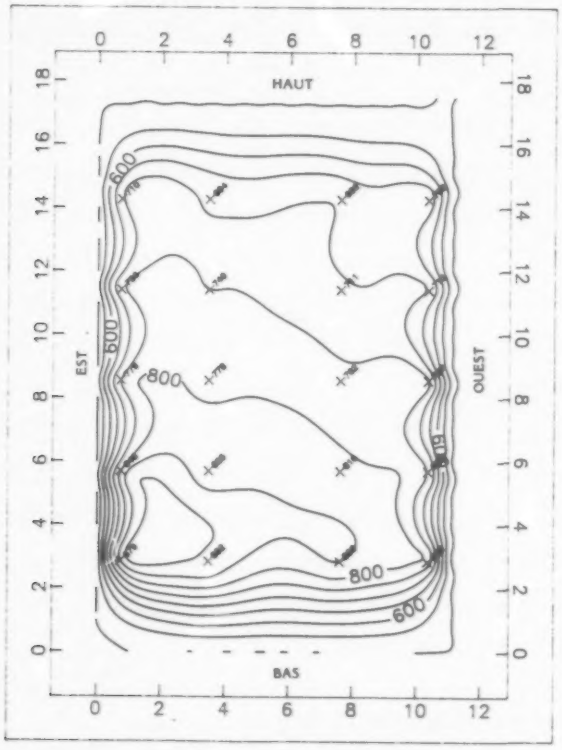


FIGURE 5.12 DISTRIBUTION DE LA TEMPÉRATURE À L'ENTRÉE DE LA CHAUDIÈRE DE RÉCUPÉRATION DE CHALEUR (EC01)

5.9 Analyses des cendres

Pour chaque essai, on a prélevé des échantillons de cendres d'incinération, de cendres de la chaudière et de cendres captées par l'électrofiltre afin de doser les composés organiques en traces et les métaux. Les résultats sont examinés ci-dessous.

5.9.1 Composés organiques en traces. - Comme le montre le tableau 5.9, les teneurs en composés organiques en traces (sauf les HAP) étaient significativement plus importantes dans les cendres captées par l'électrofiltre que dans les cendres de la chaudière et les teneurs dans ces dernières étaient supérieures à celles dosées dans les cendres d'incinération. Des tendances semblables avaient été observées lors d'autres études conduites dans le cadre du PNEEI (c.-à.-d. plus fortes teneurs observées dans les cendres fines).

Aucune différence significative des teneurs en composés organiques en traces dans les cendres n'a été observée entre les différents modes de fonctionnement. Toutefois, les quantités de cendres provenant de la chaudière et de l'électrofiltre étaient significativement plus faibles pour les essais conduits dans de bonnes conditions, ce qui indique que le rejet de composés organiques dans les cendres dépend fortement du mode de fonctionnement.

5.9.2 Métaux. - On a procédé au dosage de 30 métaux; le tableau 5.10 indique les teneurs pour les 9 métaux d'intérêt prioritaire. Pour la plupart de ceux-ci, les teneurs décroissaient dans l'ordre suivant: cendres de l'électrofiltre → cendres de la chaudière → cendres d'incinération, ce qui correspond au profil observé pour les composés organiques en traces. Toutefois, les teneurs en cuivre étaient plus élevées dans les cendres d'incinération que dans celles captées par l'électrofiltre. Les teneurs en nickel étaient semblables dans les trois cas.

Tout comme pour les composés organiques en traces, on n'a pas noté de différences significatives des teneurs par rapport au mode de fonctionnement. Il faut toutefois relever que là aussi, les taux de production des cendres de la chaudière et de l'électrofiltre sont nettement inférieurs dans de bonnes conditions, ce qui indique que dans l'ensemble, le rejet de métaux dans les cendres volantes est plus élevé en cas de mauvaises conditions de fonctionnement.

5.10 Classification des matières plastiques

Pour déterminer la quantité et les types de matières plastiques que contenaient les ordures, un programme de classification a été réalisé au cours des essais de

TABLEAU 5.9 COMPOSÉS ORGANIQUES EN TRACES PRÉSENTS DANS LES CENDRES SELON LE MODE DE FONCTIONNEMENT - ESSAIS DE PERFORMANCE

	Cendres d'incinération (ng/g)					Cendres de la chaudière (ng/g)					Cendres de l'électrofiltre (ng/g)				
Rythme d'enfournement	Lent	Nom.	Rapide	Nom.	Nom.	Lent	Nom.	Rapide	Nom.	Nom.	Lent	Nom.	Rapide	Nom.	Nom.
Temp.	Basse	Nom.	Nom.	Basse	Basse	Basse	Nom.	Nom.	Basse	Basse	Basse	Nom.	Nom.	Basse	Basse
Conditions	B	B	B	M	M	B	B	B	M	M	B	B	B	M	M
Essais (EP)	2-10-11	5-6-12	7-9	3-4	14-15	2-10-11	5-6-12	7-9	3-4	14-15	2-10-11	5-6-12	7-9	3-4	14-15
DDPC	0,11	0,21	-	0,16	-	135	37	23	43	51	757	584	620	605	945
DFPC	0,12	1,01	-	-	-	122	31	26	25	17	219	186	257	233	260
CB	16	45	4	5	4	1 567	356	531	311	259	963	892	1 663	1 381	1 515
BPC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	12	24
CP	10	16	20	-	11	112	80	102	68	59	1 242	1 820	1 701	1 287	2 968
HAP	153	538	498	155	320	71	25	21	33	69	101	111	103	122	331

-: Non détectable.
B: Bonnes; M: Médiocres.

TABLEAU 5.10 MÉTAUX D'INTÉRÊT PRIORITAIRE PRÉSENTS DANS LES CENDRES SELON LE MODE DE FONCTIONNEMENT - ESSAIS DE PERFORMANCE

	Cendres d'incinération (ng/g)					Cendres de la chaudière (ng/g)					Cendres de l'électrofiltre (ng/g)				
Rythme d'enfournement	Lent	Nom.	Rapide	Nom.	Nom.	Lent	Nom.	Rapide	Nom.	Nom.	Lent	Nom.	Rapide	Nom.	Nom.
Temp.	Basse	Nom.	Nom.	Basse	Basse	Basse	Nom.	Nom.	Basse	Basse	Basse	Nom.	Nom.	Basse	Basse
Conditions	B	B	B	M	M	B	B	B	M	M	B	B	B	M	M
Essais (EP)	2-10-11	5-6-12	7-9	3-4	14-15	2-10-11	5-6-12	7-9	3-4	14-15	2-10-11	5-6-12	7-9	3-4	14-15
Antimoine	12	16	9	26	10	342	332	270	96	245	553	753	525	730	328
Arsenic	7,7	6,8	8,3	5,7	7,7	83	91	74	45	54	133	170	130	67	46
Cadmium	3,4	3,8	2,8	3,6	4,2	286	206	153	135	211	877	1 062	764	514	475
Chrome	230	250	363	231	171	331	304	338	318	235	454	479	516	527	348
Cuivre	1 773	2 543	4 509	2 245	1 308	636	530	480	541	528	1 323	1 483	1 295	946	926
Mercure	0,0027	0,0311	0,0418	0,0087	0,0038	8,3	6,8	5,9	3,6	2,9	49	72	73	32	41
Nickel	102	131	428	89	72	111	115	101	113	109	100	108	118	98	108
Plomb	766	1 757	867	1 323	1 638	9 323	7 478	6 635	5 511	8 655	20 677	21 133	17 150	10 750	11 800
Zinc	2 307	1 783	1 531	2 551	1 172	17 600	17 400	15 650	11 100	12 750	60 900	60 700	44 750	33 800	27 300

B: Bonnes; M: Médiocres.

performance. Comme la classification nécessitait chaque fois environ deux jours, huit évaluations seulement ont pu être effectuées.

La proportion des matières plastiques contenues dans les ordures variait entre 5,6 et 10,1 p. 100, pour une valeur moyenne de 7,9 p. 100. En poids, les pellicules de plastique (sacs à ordures surtout) comptaient pour 54 p. 100, les plastiques moulés ou rigides, pour 42 p. 100 et les matières plastiques expansées, pour 4,6 p. 100.

Les polyoléfines, le polyéthylène et le polypropylène représentaient la catégorie la plus importante (63 p. 100 du poids total). Ces matières sont largement utilisées pour la fabrication de sacs à ordures et d'emballages à cause de leur faible coût et de leurs propriétés intéressantes.

Le polystyrène, avec 27,2 p. 100, venait au deuxième rang. Au Québec, on estime que 80 p. 100 du polystyrène est utilisé pour la fabrication de récipients rigides.

Le chlorure de polyvinyle (PVC) était le moins fréquent (6,3 p. 100 de l'ensemble des matières plastiques). Le PVC sert principalement à fabriquer des récipients rigides transparents, mais à cause de son prix élevé, il est peu utilisé.

5.11 Apports et rejets de métaux et de composés organiques

5.11.1 Métaux. - On a dressé un bilan de matières pour déterminer la distribution des métaux d'intérêt prioritaire pour le processus d'incinération. Pour chaque métal, on a comparé la quantité contenue dans les ordures à la quantité rejetée dans les cendres (d'incinération, de la chaudière et de l'électrofiltre) et les émissions de la cheminée. Les données ont été normalisées "par tonne d'ordures" pour chaque essai. Le tableau 5.11 fournit les valeurs établies pour sept des métaux d'intérêt prioritaire. En général, les quantités de métaux à l'entrée étaient deux fois moindres que les quantités calculées pour les rejets. Seul le chrome présentait des valeurs moindres dans les rejets que dans les ordures. Vu la difficulté d'obtenir des échantillons représentatifs des cendres d'incinération et des ordures, le bilan de matières dressé pour les métaux est considéré acceptable. Les bilans de matières établis pour les métaux lors d'essais semblables réalisés ailleurs étaient comparables (6).

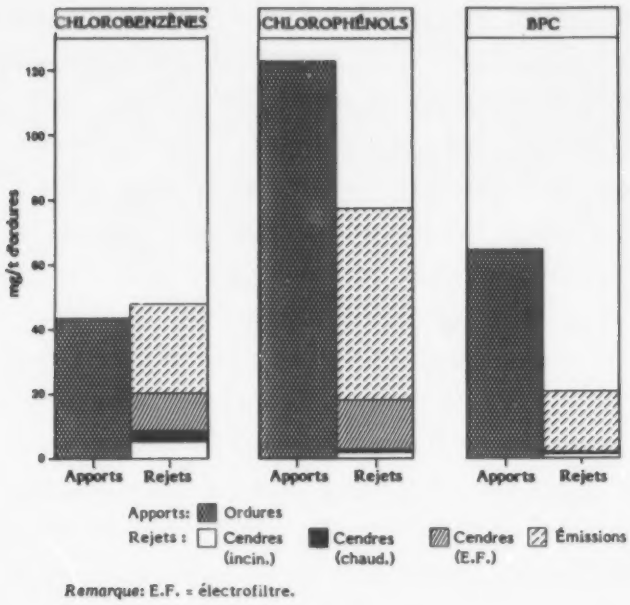
5.11.2 Composés organiques en traces. - Étant donné qu'il peut y avoir aussi bien formation que destruction de composés organiques en traces au cours des différentes étapes de l'incinération, il n'est pas possible d'obtenir un bilan de matières pour ces composés. Toutefois, une comparaison des valeurs à l'entrée et à la sortie pour des composés comme les dioxines et les furannes permet de juger s'il y a diminution ou augmentation nette des teneurs.

TABLEAU 5.11 APPORTS ET REJETS DE MÉTAUX

Métal	Apports (g/t d'ordures)	Rejets (g/t d'ordures)	Rapport apports/rejets
Cr	102	70	0,7
Pb	314	580	1,9
Ni	23	44	1,9
Sb	3	10	3,4
As	1	3	3,2
Cd	5	8	1,8
Zn	218	981	4,5

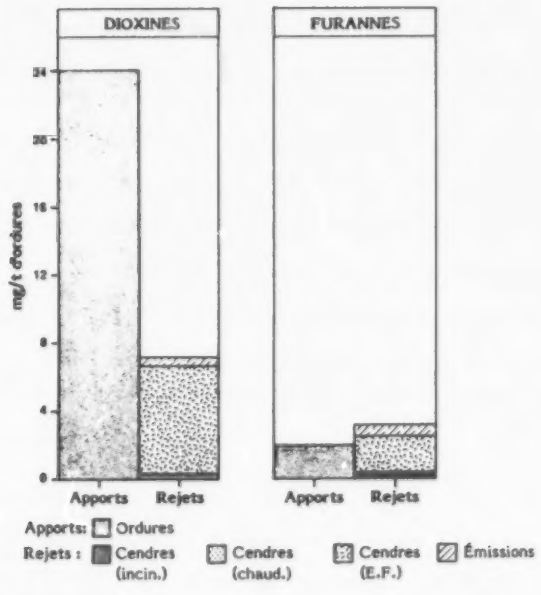
On constate à la figure 5.13 qu'il y a eu une importante diminution nette des teneurs en dioxines (par tonne d'ordures) comme l'indique le rapport apports/rejets de 0,3. Dans le cas des furannes, ce rapport était d'environ 2, ce qui constitue une augmentation nette. Des résultats semblables ont été obtenus au cours des essais conduits à l'Île-du-Prince-Édouard.

La figure 5.14 indique une diminution nette significative des teneurs en biphényles polychlorés et en chlorophénols, mais une légère augmentation pour ce qui est des chlorobenzènes.



Remarque: E.F. = électrofiltre.

FIGURE 5.13 APPORTS/REJETS DE DIOXINES ET DE FURANNES (moyenne pour tous les essais)



Remarque: E.F. = électrofiltre.

FIGURE 5.14 APPORTS/REJETS DE CHLOROBENZÈNES, CHLOROPHÉNOLS ET BIPHÉNYLES POLYCHLORÉS (moyenne pour tous les essais)

6 RAPPORT ENTRE LES ÉMISSIONS ET LES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT

Le présent chapitre résume les analyses statistiques de 148 paramètres réalisées avec les données des essais individuels. Tous les paramètres ont été analysés et des corrélations ont été faites afin de dégager les faits les plus significatifs. Ces corrélations ont été soumises à plusieurs contre-vérifications afin de déterminer si elles méritaient d'être examinées plus en détail.

Les analyses statistiques comportaient les corrélations et objectifs suivants:

- régression linéaire simple d'émissions de composés organiques et inorganiques choisis par rapport aux données d'émissions continues et de variables du procédé, pour identifier les paramètres les plus importants à considérer pour la régression linéaire multiple;
- régression linéaire multiple d'émissions de composés organiques choisis par rapport aux données d'émissions continues et de variables de fonctionnement, afin d'élaborer un modèle qui permettrait de prévoir et(ou) réduire les émissions de composés organiques.

6.1 Méthodologie de l'analyse statistique

La technique d'analyse statistique utilisée pour identifier les équations de corrélation était l'analyse de régression. On obtient, par cette technique, un modèle mathématique qui décrit le mieux les relations entre des ensembles de données. Les modèles de régression sont utilisés pour décrire les données, évaluer les valeurs inconnues et, ce qui est plus important pour cette étude, pour prévoir et évaluer les émissions à partir d'autres variables.

Afin d'établir une relation entre des paires de variables, l'analyse de régression est utilisée pour "ajuster" une fonction à des données. Dans la plupart des recherches, il est difficile d'obtenir une courbe de régression, et plus particulièrement une droite qui s'ajuste parfaitement aux données. Pour estimer la validité de l'ajustement, on calcule le coefficient de corrélation r, et le coefficient de détermination r^2.

La valeur de r peut être positive ou négative. Un signe positif indique que les deux ensembles de variables croissent ou décroissent en même temps. Un signe négatif indique que l'un croît tandis que l'autre décroît. Quand il y a ajustement parfait (sans erreur), la valeur de r est de ± 1,0 et le signe dépend de la pente de la courbe. De même, une valeur de 0 signifie une relation linéaire inexistante entre les variables.

Le coefficient de détermination r^2 est le carré du coefficient de corrélation r. Cette valeur est optimisée en statistiques parce qu'elle élimine le signe négatif qui peut être associé à r et constitue une façon pratique de comparer la précision de l'ajustement de différents modèles de régression. En outre, r^2 décrit la part de la variance totale qui est expliquée par la corrélation. Par conséquent, plus la valeur de r^2 est voisine de 1,0 meilleure est la validité de l'ajustement. .

La valeur de r^2 est essentiellement une mesure de la variance totale expliquée par une corrélation linéaire entre deux variables. Les valeurs de r^2 peuvent être jugées de façon relative (en comparant un paramètre à un autre) ou de façon absolue (c.-à.-d. par définition d'une valeur minimale de r^2 à partir de laquelle la corrélation sera jugée acceptable). Colton (7) suggère que les valeurs de r^2 pour différents niveaux d'ajustement peuvent être comprises entre 0,13 et 0,56. Des valeurs de r^2 plus importantes que celles suggérées par Colton pour décrire le même intervalle de rapport (médiocre, bon, excellent) sont probablement appropriées pour cette étude et ont été suggérées par le CNRC (8). Le tableau 6.1 présente l'information nécessaire pour les données de corrélation expérimentale. Chacune de ces références suppose qu'un nombre suffisamment grand de points de données est utilisé pour fournir les valeurs de r^2. De grands échantillons permettent effectivement d'abaisser le niveau auquel une corrélation entre deux variables devient significative.

TABLEAU 6.1 CARACTÈRE SIGNIFICATIF DES DONNÉES DE CORRÉLATION EXPÉRIMENTALE

Corrélation	r^2 Colton (7)	r^2 Expérience contrôlée	r^2 Étude sur place
Peu ou pas du tout	0,13		
Médiocre	0,25	0,50	0,45
Moyenne	0,56	0,65	0,55
Bonne	>0,56	0,80	0,65
Très bonne	-	0,90	0,80
Excellente	-	0,95	0,90

Pour ce programme d'essais, treize paires de données ont été choisies pour l'analyse linéaire de régression simple basée sur treize essais. À partir d'une table de

corrélation statistique normalisée, la valeur critique de r^2 pour treize paires de données avec un niveau de signification de 5 p. 100 est de 0,306. L'utilisation de la valeur critique à un niveau de signification de 5 p. 100 permet de déterminer si des corrélations existent entre les variables. Donc, si pour treize paires de données (niveau de signification de 5 p. 100), la valeur calculée de r^2 est inférieure à 0,306, il n'existe aucune corrélation entre les variables comparées. Une fois qu'on a établi qu'il existe une corrélation pour n'importe quelle valeur de r^2, la valeur relative de l'ajustement entre les différents paramètres peut être évaluée à partir des données du tableau 6.1.

Pour les modèles de régression linéaire simple et multiple, le calcul de r^2 était basé sur la méthode statistique normalisée du calcul des écarts types des divers ensembles de données et de la co-variance entre les ensembles de données.

6.2 Stratégie de l'analyse des données

6.2.1 Variables dépendantes. - L'un des principaux objectifs de cette étude était d'évaluer l'influence des différentes conditions de fonctionnement sur les émissions. Les émissions ont été choisies comme variables dépendantes aux fins de l'analyse des données. Les émissions (variables dépendantes) présentant un intérêt particulier étaient:

- les dioxines (DDPC);
- les furannes (DFPC);
- les chlorophénols (CP);
- les chlorobenzènes (CB);
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP);
- les biphényles polychlorés (BPC);
- les particules;
- les métaux lourds.

6.2.2 Variables indépendantes. - Les variables indépendantes utilisées dans l'analyse des données ont été choisies sans perdre de vue les deux objectifs suivants:

1) Établissement de modèles prévisionnels - pour disposer d'une méthode permettant de prévoir les teneurs en polluants susmentionnés à partir de paramètres plus facilement mesurables (variables de remplacement).
2) Établissement de modèles de contrôle - pour identifier les conditions de fonctionnement ou les limites qui, lorsque respectées, permettent de contrôler et de minimiser les émissions de polluants.

Pour atteindre ces objectifs, les variables indépendantes ont été séparées en deux groupes: d'une part, celles utilisées pour produire les modèles prévisionnels et

appelées "variables de surveillance"; d'autre part, celles utilisées pour produire les modèles de contrôle, appelées "variables de fonctionnement".

Les variables de surveillance du modèle prévisionnel étaient:

i) température dans la partie inférieure (bas) de la chambre de rayonnement (°C);

ii) température dans la partie supérieure (haut) de la chambre de rayonnement (°C);

iii) excès d'air exprimé en excès d'oxygène (%);

iv) humidité des gaz de combustion (%);

v) teneur des gaz de combustion en monoxyde de carbone (ppm);

vi) teneur des gaz de combustion en oxydes d'azote (ppm).

Les variables de fonctionnement du modèle de contrôle étaient:

i) air primaire (c.-à-d. air injecté sous la zone de combustion) (m^3N/mn);

ii) air secondaire (c.-à-d. air injecté au-dessus de la zone de combustion) (m^3N/mn);

iii) air total (m^3N/mn);

iv) rapport air primaire/air secondaire;

v) rapport air secondaire avant/arrière;

vi) débit exprimé en production de vapeur (t/h).

6.3 Corrélations et analyse de régression linéaire simple

6.3.1 Dioxines. - La communauté scientifique considère les dioxines comme étant des polluants organiques en traces importants, dont la production peut être limitée au cours du processus de combustion dans un incinérateur municipal. Comme on le verra plus loin, on a mis en évidence des corrélations significatives entre les teneurs en dioxines et un certain nombre de variables de fonctionnement et de surveillance.

Aux fins de la présente étude, on a supposé un rendement d'épuration constant de l'électrofiltre pour les composés organiques en traces. Cette hypothèse se basait sur le rendement d'épuration relativement constant de celui-ci pour les particules et les métaux, ainsi que sur une bonne corrélation entre les émissions de particules et de dioxines ($r^2 = 0,64$).

Le tableau 6.2 présente les corrélations entre les teneurs en dioxines et des variables de fonctionnement choisies. La corrélation du débit d'air primaire avec les dioxines est assez significative, avec une valeur de r^2 de 0,83. Il est intéressant de noter l'absence d'une telle corrélation lorsque l'incinération se déroulait dans de bonnes conditions. Par contre, on constate une forte corrélation quand toutes les conditions de fonctionnement sont considérées (voir figure 6.1).

TABLEAU 6.2 CORRÉLATIONS ENTRE LES TENEURS EN DIOXINES ET LES VARIABLES DE FONCTIONNEMENT

Paramètre corrélé	Coefficient de détermination (r^2)
Air primaire (m^3N/mn)	0,83 (très bonne corrélation)
Air secondaire (m^3N/mn)	0,04 (aucune)
Air total (m^3N/mn)	0,51 (médiocre)
Rapport air primaire/air secondaire	0,14 (aucune)
Rapport air secondaire avant/arrière	0,01 (aucune)
Production de vapeur (t/h)	0,08 (aucune)

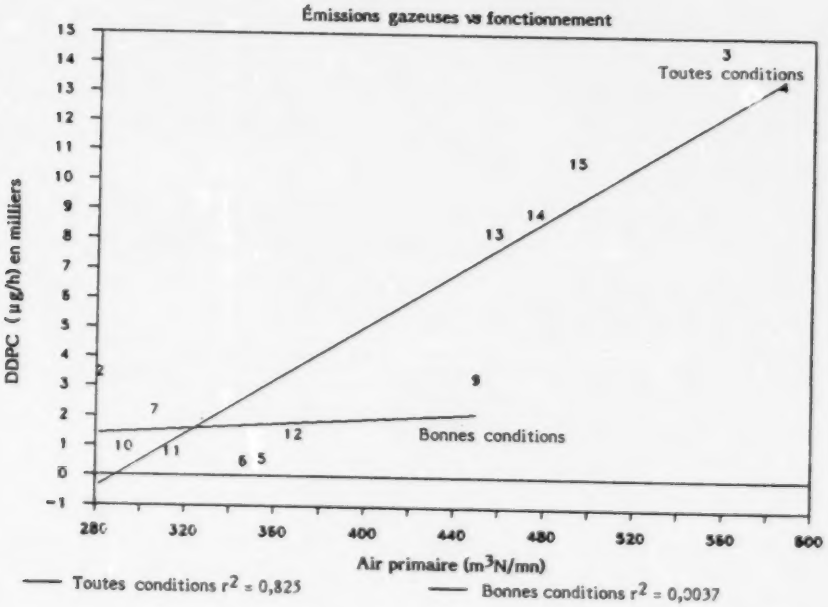


FIGURE 6.1 CORRÉLATION ENTRE LES TENEURS EN DIOXINES ET LE DÉBIT D'AIR PRIMAIRE

Comme l'indique le tableau 6.3, de faibles corrélations ont été observées entre les émissions de dioxines et la température dans le bas de la chambre de rayonnement, la température dans le haut de la chambre de rayonnement et la température à l'entrée de la chaudière. Toutefois, un examen plus approfondi de la dispersion des points sur la

figure 6.2 indique une corrélation significative entre les émissions de DDPC et la température dans le bas de la chambre de rayonnement si les points correspondant aux essais 2, 10 et 11 (rythme d'enfournement lent) sont considérés comme faisant partie d'une deuxième famille de courbes. Les autres essais (conduits avec un rythme d'enfournement nominal et rapide) indiquent des corrélations avec des valeurs significatives de r^2 supérieures à 0,7. Malheureusement, seulement trois essais ont été effectués avec un rythme d'enfournement lent; il faudrait obtenir plus de données aux autres températures à ce rythme d'enfournement pour déterminer de façon décisive si deux courbes séparées existent.

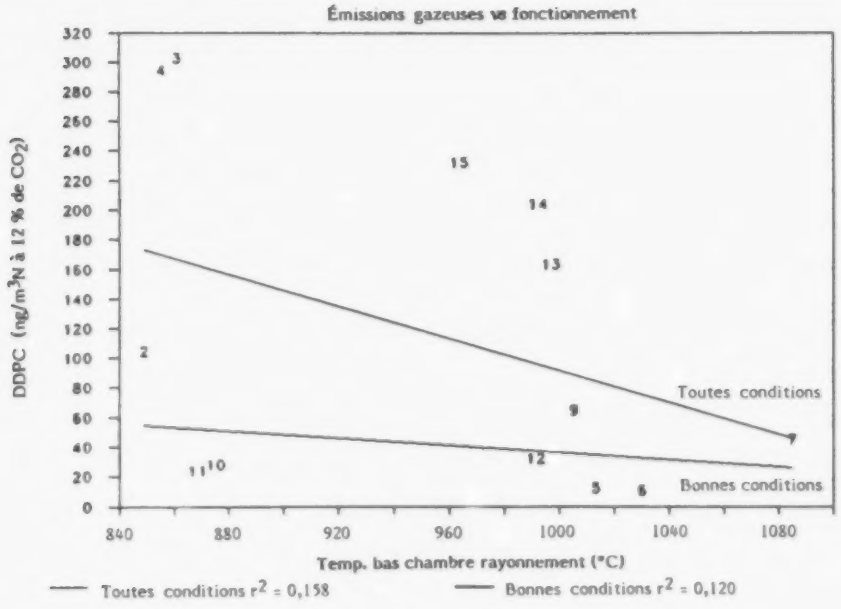


FIGURE 6.2 CORRÉLATION ENTRE LES TENEURS EN DIOXINES ET LA TEMPÉRATURE DANS LE BAS DE LA CHAMBRE DE RAYONNEMENT

Une comparaison entre les teneurs en monoxyde de carbone et en dioxines totales a indiqué une bonne corrélation ($r^2 = 0,50$), comme le montre la figure 6.3. Toutefois, aucune corrélation n'a été observée quand on n'a considéré que les bonnes conditions de fonctionnement (teneur en CO inférieure à 50 ppm).

Les coefficients de détermination du tableau 6.3 mesurés pour les dioxines en fonction des oxydes d'azote, du chlorure d'hydrogène, du dioxyde de soufre et de l'excès

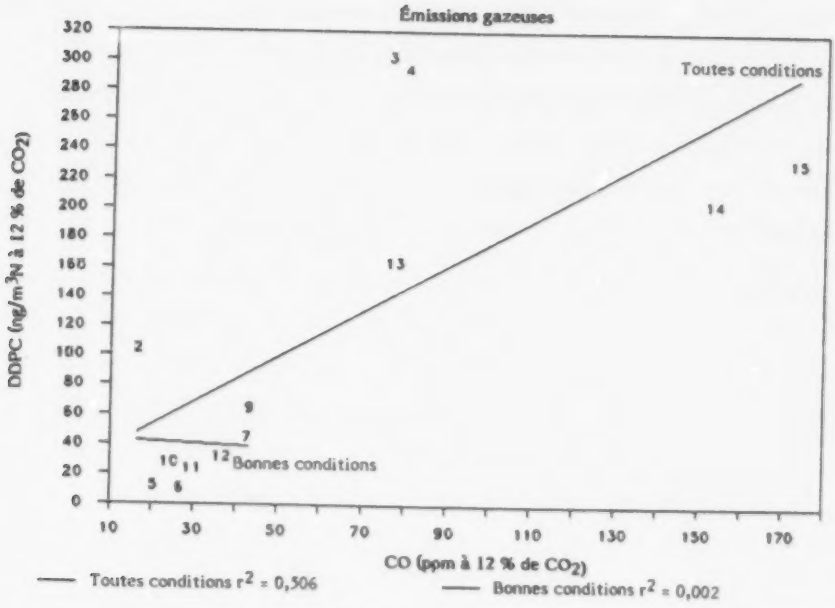


FIGURE 6.3 CORRÉLATION ENTRE LES TENEURS EN DIOXINES ET LA TENEUR EN MONOXYDE DE CARBONE

TABLEAU 6.3 CORRÉLATIONS ENTRE LES TENEURS EN DIOXINES ET LES VARIABLES DE SURVEILLANCE

Paramètre corrélé	Coefficient de détermination (r^2)
Température - bas chambre rayonnement (°C)	0,15 (aucune corrélation)
Température - haut chambre rayonnement (°C)	0,20 (aucune)
Excès d'air	0,16 (aucune)
Humidité des gaz (%)	0,05 (aucune)
Monoxyde de carbone	0,50 (médiocre)
Oxydes d'azote	0,38 (faible)
Dioxyde de soufre	0,31 (faible)
Chlorure d'hydrogène	0,12 (aucune)
Particules	0,64 (bonne)
Cadmium	0,74 (très bonne)
Cuivre	0,77 (très bonne)
Zinc	0,70 (très bonne)
Température - entrée de la chaudière (°C)	0,15 (aucune)

d'air étaient compris entre très bons et nuls. Les valeurs des corrélations entre dioxines et émissions de particules et de métaux choisis (cadmium, cuivre et zinc) étaient très élevées. Il est très important de noter la forte corrélation entre la teneur en dioxines et celle en cuivre. En se basant sur d'autres études, on a suggéré que le cuivre pourrait servir de catalyseur pour la formation des dioxines. Cette hypothèse semble être appuyée par le coefficient de détermination élevé qui en résulte (r^2 = 0,77) (9, 10).

6.3.2 Furannes. - Tout comme pour les dioxines, il existe des corrélations significatives entre les teneurs en furannes et les variables de surveillance, de fonctionnement et autres.

Les corrélations entre les teneurs en furannes des émissions gazeuses par rapport aux variables de fonctionnement choisies sont présentées dans le tableau 6.4. Comme pour les dioxines, les teneurs en furannes sont en corrélation avec le débit des gaz évacués et le débit d'air primaire (comme le montre la figure 6.4), avec des valeurs de r^2 de 0,76 et 0,78 respectivement. L'apport d'air secondaire n'influencerait par contre pas les teneurs en furannes, alors qu'il y avait corrélation dans le cas des dioxines.

TABLEAU 6.4 CORRÉLATIONS ENTRE LES TENEURS EN FURANNES ET LES VARIABLES DE FONCTIONNEMENT

Paramètre corrélé	Coefficients de détermination (r^2)
Air primaire (m^3N/mn)	0,68 (bonne corrélation)
Air secondaire (m^3N/mn)	0,00 (aucune)
Air total (m^3N/mn)	0,29 (médiocre)
Rapport air primaire/air secondaire	0,26 (médiocre)
Rapport air secondaire avant/arrière	0,09 (aucune)
Production de vapeur (t/h)	0,05 (aucune)

Comme le montrent la figure 6.5 et le tableau 6.5, il ne semble pas y avoir de corrélation significative entre les teneurs en furannes et les températures de fonctionnement. Toutefois, un examen attentif du diagramme de dispersion fait croire à l'existence d'une deuxième famille de courbes, là aussi.

Comme on s'y attendait, la teneur en furannes présentait une forte corrélation avec les teneurs en monoxyde de carbone, avec une valeur de r^2 de 0,61. Par contre, la

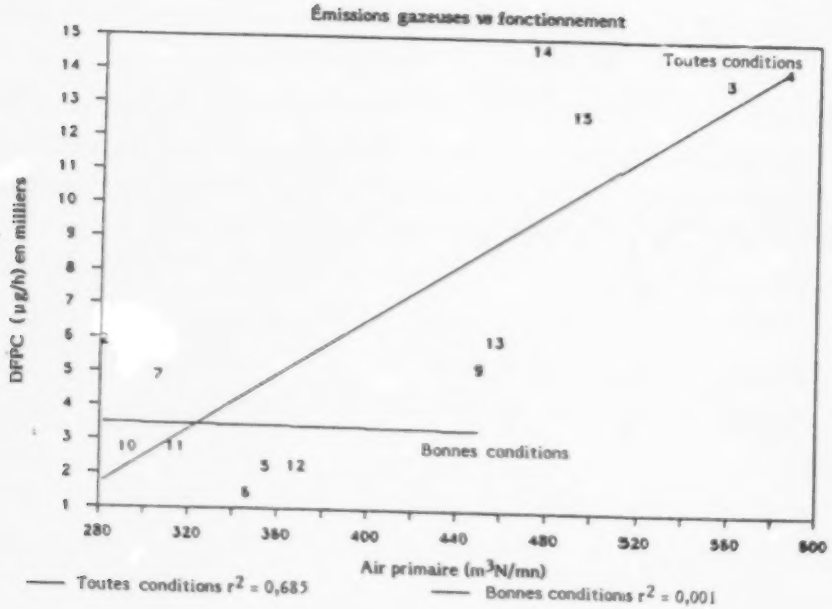


FIGURE 6.4 CORRÉLATION ENTRE LES TENEURS EN FURANNES ET LE DÉBIT D'AIR PRIMAIRE

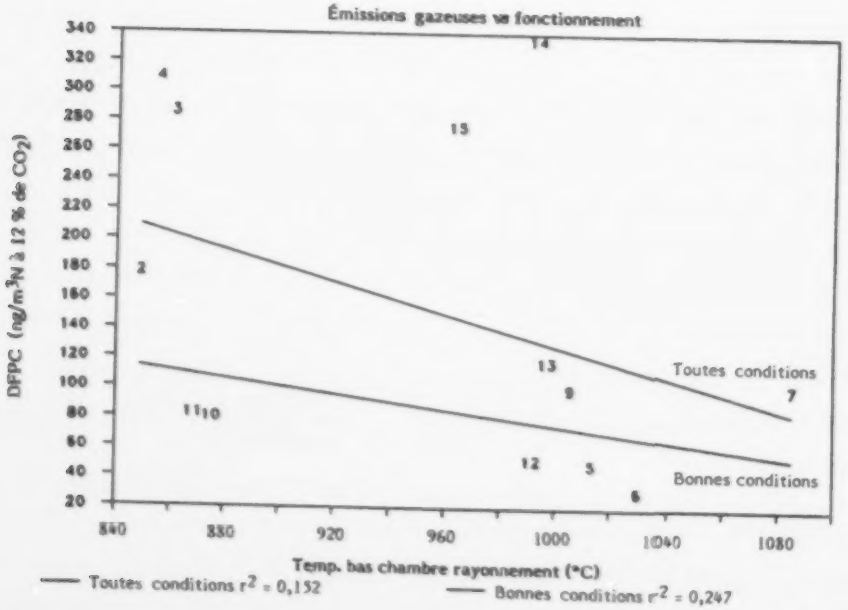


FIGURE 6.5 CORRÉLATION ENTRE LES TENEURS EN FURANNES ET LA TEMPÉRATURE DANS LE BAS DE LA CHAMBRE DE RAYONNEMENT

TABLEAU 6.5 CORRÉLATIONS ENTRE LES TENEURS EN FURANNES ET LES VARIABLES DE SURVEILLANCE

Paramètre corrélé	Coefficient de détermination (r^2)
Température dans le bas de la chambre de rayonnement (°C)	0,15 (aucune corrélation)
Température dans le haut de la chambre de rayonnement (°C)	0,25 (aucune)
Excès d'air	0,24 (aucune)
Humidité des gaz de combustion (%)	0,15 (aucune)
Monoxyde de carbone	0,60 (bonne)
Oxydes d'azote	0,28 (faible)
Dioxyde de soufre	0,32 (faible)
Chlorure d'hydrogène	0,14 (aucune)
Particules	0,63 (bonne)
Cadmium	0,75 (très bonne)
Cuivre	0,72 (très bonne)
Zinc	0,63 (très bonne)
Température - entrée de la chaudière (°C)	0,18 (aucune)

corrélation n'est que faible lorsqu'on met en rapport les teneurs en furannes avec les émissions d'oxydes d'azote, de chlorure d'hydrogène, de dioxyde de soufre et l'excès d'air.

Tel que mentionné précédemment, il se pourrait que le cuivre agisse comme catalyseur pour la formation de certains composés organiques en traces. Les teneurs en métaux en traces des émissions gazeuses ont été comparées aux émissions de furannes (voir tableau 6.5). Le cuivre ($r^2 = 0,72$) et le cadmium ($r^2 = 0,70$) présentaient de fortes corrélations; suivent les particules et le zinc ($r^2 = 0,63$ dans les deux cas). Aucune corrélation avec les teneurs en HAP ou BPC n'est ressortie à l'examen des données pour l'ensemble des essais.

6.3.3 Particules. - La teneur en particules des gaz de combustion a été comparée à de nombreux paramètres et on a constaté que le débit d'air primaire et le débit des gaz l'influençaient fortement ($r^2 = 0,62$ et 0,69 respectivement). Tel que mentionné, la quantité d'air insufflé sous la grille de combustion principale a une influence directe sur l'entraînement de solides hors de la zone de combustion. Par conséquent, on doit

s'attendre à ce que les teneurs en particules soient en relation directe avec le débit d'air primaire.

Les corrélations entre les teneurs en particules et en composés organiques des émissions gazeuses étaient bonnes. Tel qu'indiqué, de fortes corrélations ont été observées pour les dioxines (r^2 = 0,64) et pour les furannes (r^2 = 0,62). En outre, la corrélation entre chlorobenzènes et particules était aussi excellente (r^2 = 0,67); elle était moins accentuée pour les chlorophénols (r^2 = 0,46).

Comme on s'y attendait, on a observé des corrélations significatives entre les teneurs en particules des émissions et les teneurs en métaux en traces choisis, par exemple le cadmium, le cuivre et le plomb, avec des valeurs de r^2 de 0,86, 0,94 et 0,90, respectivement.

6.3.4 Métaux. - Comme on l'a mentionné précédemment, les métaux lourds et notamment l'antimoine, le cadmium, le chrome, le cuivre et le zinc pourraient servir de catalyseurs dans la formation des dioxines, des furannes, des chlorobenzènes et des chlorophénols. D'après les données présentées au tableau 6.6, un certain nombre de fortes corrélations viennent étayer cette théorie. Par exemple, les dioxines et les furannes sont en bonne corrélation avec six des neuf métaux mentionnés. La corrélation entre ces métaux et les chlorobenzènes et les chlorophénols n'est pas aussi étroite. La corrélation entre le mercure et le nickel et l'ensemble des données relatives aux composés organiques est faible (r^2 = environ 0,1 dans les deux cas).

Aucune corrélation n'a été dégagée entre les HAP et les BPC et l'un quelconque des métaux considérés.

TABLEAU 6.6 COEFFICIENTS DE DÉTERMINATION (r^2) POUR LES ÉMISSIONS DE MÉTAUX vs LES COMPOSÉS ORGANIQUES EN TRACES

Composé organique	Sb	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
DDPC	0,77	0,35	0,74	0,59	0,77	0,48	0,01	0,11	0,70
DFPC	0,54	0,43	0,70	0,44	0,72	0,52	0,00	0,05	0,63
CB	0,65	0,38	0,77	0,55	0,34	0,58	0,03	0,11	0,64
CP	0,50	0,31	0,51	0,41	0,61	0,40	0,00	0,07	0,45
HAP	0,06	0,03	0,13	0,14	0,08	0,00	0,10	0,01	0,13
BPC	0,00	0,00	0,01	0,08	0,00	0,00	0,09	0,09	0,00

Les corrélations établies entre les métaux d'intérêt prioritaire présents dans les ordures et les teneurs en métaux des émissions, d'après le taux d'enfournement, étaient toutes très faibles à l'exception de l'antimoine (r^2 = 0,53). Ce résultat indiquerait que les méthodes d'échantillonnage utilisées n'étaient pas parfaites. Lors des essais, on a retiré certaines pièces métalliques trop encombrantes avant le déchiquetage et l'analyse. Il faudra utiliser des méthodes plus perfectionnées pour obtenir des échantillons représentatifs des ordures dans les prochains programmes d'essais, afin que les bilans de matières pour les métaux soient plus précis.

6.3.5 Monoxyde de carbone. - La figure 6.6 indique la corrélation entre un certain nombre de composés organiques en traces présents dans les émissions et le monoxyde de carbone. En plus des corrélations relativement fortes déjà établies entre les dioxines et le monoxyde de carbone, et entre les furannes et le monoxyde de carbone, on a trouvé des corrélations du même ordre entre les teneurs en chlorobenzènes et en chlorophénols et les teneurs en monoxyde de carbone. On a proposé l'existence d'une relation entre la teneur des émissions en composés organiques en traces et la teneur des gaz de combustion en monoxyde de carbone. Cette théorie s'appliquerait dans une certaine mesure pour les dioxines et les furannes, si l'on en juge les résultats. D'autres composés organiques importants, comme les HAP (r^2 = 0,0) et les BPC (r^2 = 0,05), n'ont présenté aucune corrélation. On n'a trouvé aucune corrélation entre la teneur en monoxyde de carbone et la teneur en composés organiques en traces lorsqu'on tenait compte seulement des résultats des essais conduits dans de bonnes conditions de fonctionnement, c'est-à-dire moins de 50 ppm de CO. On a émis l'hypothèse que dans de telles conditions, les données ont tendance à être groupées, d'où la difficulté d'établir des corrélations et le résultat obtenu.

6.4 Analyse de régression linéaire multiple - Émissions de composés organiques

6.4.1 Généralités. - La seconde phase de l'analyse des données comportait une analyse de régression linéaire multiple. Les coefficients de détermination obtenus à partir des modèles de régression multiple pour les émissions de composés organiques en traces sont résumés au tableau 6.7. Ces résultats indiquent que l'analyse de régression multiple a donné des ajustements nettement meilleurs que l'analyse de régression simple. Les modèles de régression multiple ont donné des valeurs de r^2 de 0,8 à 0,9 pour les dioxines, les furannes, les chlorophénols et les chlorobenzènes, comparativement à une plage de 0,5 à 0,8 avec la régression simple. Les modèles de régression multiple seraient donc mieux en mesure d'identifier les variables indépendantes qui permettraient de prévoir et limiter les émissions de dioxines, de furannes, de chlorophénols et de chlorobenzènes.

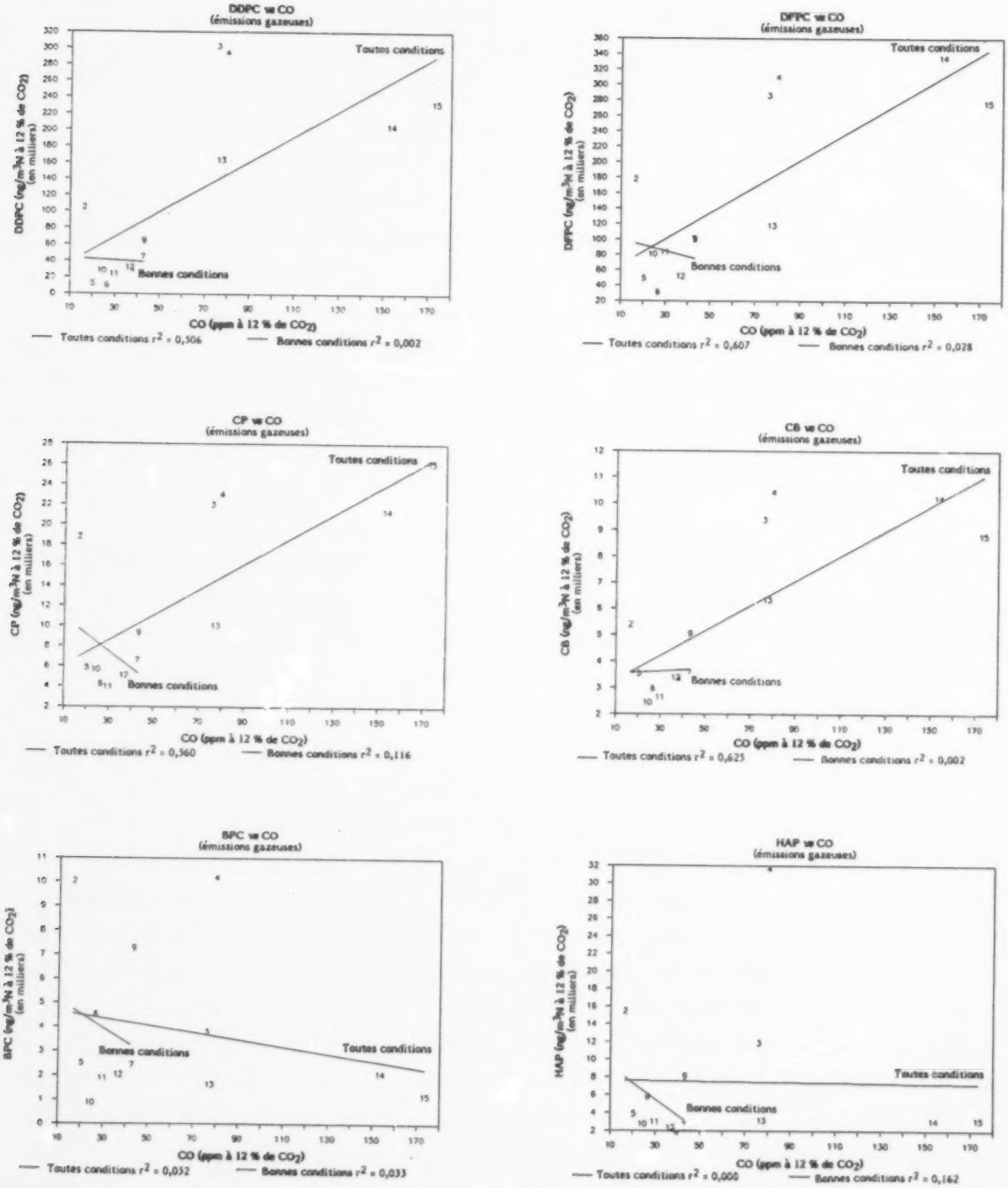


FIGURE 6.6 CORRÉLATIONS ENTRE LES TENEURS EN COMPOSÉS ORGANIQUES ET LA TENEUR EN MONOXYDE DE CARBONE (rapportées à 12 % de CO_2)

TABLEAU 6.7 RÉSUMÉ DES COEFFICIENTS DE DÉTERMINATION POUR LES MODÈLES DE RÉGRESSION

Composé organique	Régression simple		Régression multiple	
	Modèles prévisionnels (r^2)	Modèles de contrôle (r^2)	Modèles prévisionnels (r^2)	Modèles de contrôle (r^2)
Dioxines	0,51	0,77	0,89	0,89
Furannes	0,61	0,55	0,90	0,84
CP	0,56	0,50	0,86	0,77
CB	0,62	0,67	0,87	0,82
HAP	0,67	0,40	0,73	0,63
BPC	0,54	0,16	0,62	0,27

Comme on l'a mentionné au début de ce chapitre, les variables indépendantes considérées dans l'analyse des données ont été choisies en fonction de deux objectifs distincts:

1) Prévoir la teneur en polluants d'après des variables plus facilement mesurables.
2) Déterminer la façon de réduire les émissions de polluants.

Pour atteindre ces objectifs, les variables indépendantes ont été séparées en deux groupes: variables de surveillance (pour élaborer les modèles prévisionnels) et variables de fonctionnement (pour élaborer les modèles de contrôle).

On a produit des corrélations de régression multiple en utilisant entre 2 et 6 variables. Au besoin, on faisait intervenir d'autres variables pour tenter d'améliorer les modèles. Si malgré l'addition d'une variable le coefficient de détermination (r^2) n'augmentait pas d'au moins 0,01 par rapport au modèle précédent, la variable considérée était rejetée puisqu'elle n'influençait pas l'ajustement de manière significative. Le nombre final de variables utilisées dans les modèles du "meilleur ajustement" était basé sur l'expérience et sur le jugement des examinateurs. Dans la majorité des cas, on a choisi des modèles à trois variables. À quelques reprises, on a opté pour des modèles à deux variables vu que l'ajout de variables n'avait apporté aucune amélioration significative.

On a choisi les variables de fonctionnement du modèle de contrôle parmi celles qui reflétaient le mieux les trois "t" de la combustion - temps de séjour, température et turbulence. Les modèles de contrôle qui comportaient plus de variables que nécessaire

pour représenter ces trois caractéristiques ont été rejetés. Par conséquent, on a adopté des équations à trois variables pour la plupart des modèles si l'on excepte les équations à deux variables retenues pour les raisons déjà mentionnées.

Les modèles prévisionnels employés ont été divisés en deux groupes:

a) les modèles tenant compte des oxydes d'azote;

b) les modèles qui les excluaient.

Cette division a été réalisée en raison de l'incertitude relative à l'importance des teneurs en oxydes d'azote dans l'équation.

Les modèles de contrôle ont également été divisés en deux groupes:

a) les modèles utilisant la production de vapeur;

b) les modèles utilisant le rythme d'enfournement des ordures.

La très forte corrélation entre la production de vapeur et le rythme d'enfournement des ordures excluait la possibilité de traiter ces variables comme si elles étaient indépendantes l'une de l'autre.

Les graphiques de régression multiple présentés dans ce chapitre indiquent par une diagonale la position du "meilleur ajustement" entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées. Les nombres reportés sur les graphiques indiquent les valeurs réelles obtenues et les points numérotés de 2 à 15 correspondent aux essais de performance EP02 à EP15. Plus les nombres sont près de la diagonale, plus le modèle est valide.

On a tracé deux droites parallèles de part et d'autre de la diagonale représentant le "meilleur ajustement". Chaque droite est décalée de "l'ajustement parfait" d'une distance égale à la moyenne des valeurs absolues de tous les résiduels. La bande formée par ces droites est appelée bande résiduelle et elle sert à représenter visuellement la valeur de r^2. La bande résiduelle n'a aucune signification statistique en dehors des comparaisons visuelles entre les modèles de corrélation. Plus elle est étroite, plus les nombres sont proches de la diagonale et par conséquent, plus les valeurs de r^2 sont élevées et meilleure est la validité du modèle. À mesure que l'on ajoute d'autres variables au modèle, la bande résiduelle doit se rétrécir, sinon il faut le rejeter.

Les tableaux qui accompagnent certains graphiques indiquent l'accroissement progressif des valeurs de r^2 obtenu en passant d'un modèle à une variable à un modèle à deux variables puis à un modèle à trois variables. On a fait ressortir les coefficients de régression correspondant au modèle du meilleur ajustement dans chaque tableau et les équations du meilleur ajustement obtenues de ces coefficients de régression figurent au bas de chaque tableau.

6.4.2 Dioxines

Modèles prévisionnels. - Le modèle prévisionnel qui tenait compte des oxydes d'azote, du monoxyde de carbone et de l'humidité des gaz de combustion a donné les valeurs les plus élevées de r^2 (0,89). Comme le montre la figure 6.7A, ce modèle s'ajuste uniformément et étroitement autour de la diagonale car la bande résiduelle est étroite, à l'exception du point 3 (EP03), bien au-dessous de la droite, ce qui indique que le modèle prévoit une teneur en dioxines inférieure à celle réellement mesurée lors de cet essai. Malgré l'effet de ce point sur le modèle, tous les autres points s'ajustent exceptionnellement bien.

Un modèle prévisionnel semblable qui ne tenait pas compte des données sur les oxydes d'azote ne s'ajustait pas très bien à la droite, comme l'indique la figure 6.7B où la bande résiduelle est plus large. Les points EP03, 04, 07 et 11 s'ajustaient aussi mal que le point EP03 à la figure 6.7A, ce qui expliquerait la valeur plus faible de r^2 (0,72). Les points forment une bande centrée sur la diagonale et cette bande a une largeur pratiquement égale sur toute la plage des valeurs de la teneur en dioxines. D'après ces résultats, l'hypothèse d'une relation linéaire serait correcte. Comme l'indique le tableau 6.8, les modèles tenant compte des oxydes d'azote (6.7A) ou non (6.7B) ont utilisé le monoxyde de carbone comme principale variable.

Modèle de contrôle. - Le modèle de contrôle des teneurs en dioxines est présenté à la figure 6.7C. Ce modèle s'ajuste aussi bien à la droite que le modèle prévisionnel tenant compte des teneurs en oxydes d'azote, comme on peut le voir en comparant les bandes résiduelles. Les fortes corrélations ($r^2 = 0,89$) obtenues avec ce modèle portent à croire qu'il est possible de limiter les émissions de dioxines par ajustement du débit d'air de combustion total, du rapport air primaire/air secondaire et de la production de vapeur.

Sur les trois figures, les points représentant de mauvaises conditions de fonctionnement (3, 4, 14 et 15) sont répartis dans le coin supérieur droit du graphique. Il s'agit également de la région correspondant aux émissions de dioxines les plus élevées. Comme on l'avait prévu, les mauvaises conditions de fonctionnement ont entraîné une augmentation des teneurs en dioxines.

Le tableau 6.8 fournit des données supplémentaires sur la relation entre les teneurs en dioxines et les variables de fonctionnement et de surveillance. D'après le tableau 6.8A, on peut voir qu'une augmentation de la teneur en monoxyde de carbone, en oxydes d'azote ou de l'humidité des gaz de combustion s'accompagnent d'émissions accrues de dioxines. Cependant, d'après les données du tableau 6.8B où il n'est pas tenu compte de

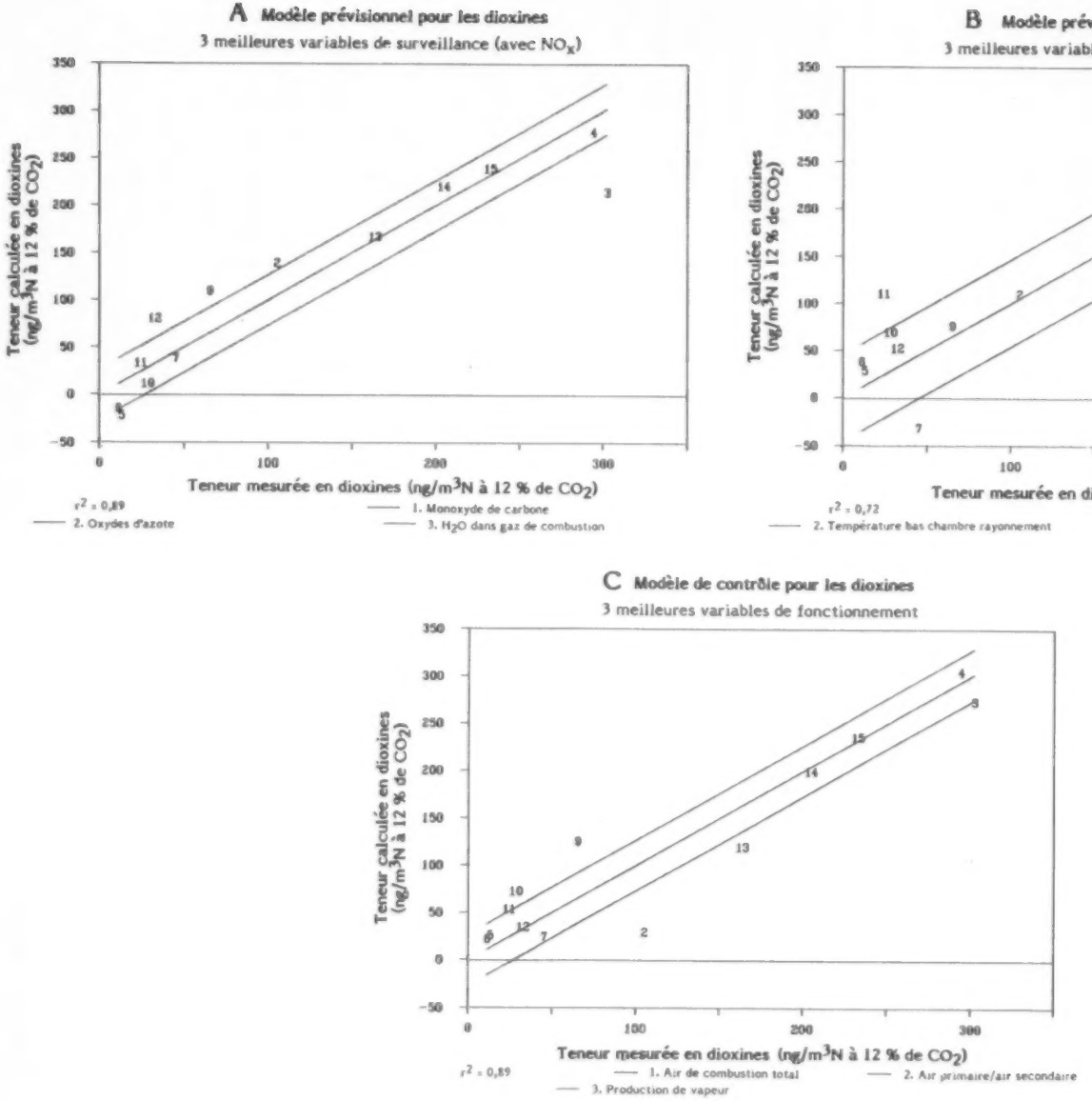


FIGURE 6.7 CORRÉLATIONS TROUVÉES POUR LES DIOXINES

TABLEAU 6.8 ANALYSE DE RÉGRESSION MULTIPLE POUR LES MODÈLES RELATIFS AUX DIOXINES

A Modèle prévisionnel pour les dioxines (ng/m³N à 12 % de CO_2)

3 meilleures variables de surveillance (avec NO_x)

Variables	Unités	1	2	3	4
r^2		0,51	0,88	0,89	0,91
Monoxyde de carbone	ppm	1,55	1,52	1,58	1,68
Oxydes d'azote	ppm		2,93	3,10	2,86
Humidité des gaz de combustion	%			8,30	
Teneur en oxygène des gaz de combustion (sec)	%				- 32,9
Température dans le bas de la chambre de rayonnement	°C				- 0,545
Coordonnée à l'origine		22,1	- 561	- 717	324
C(p)		28,0	2,08	3,38	4,01

Équation prévisionnelle du meilleur ajustement.
DDPC totales = Monoxyde de carbone x 1,58 + oxydes d'azote x 3,10 + humidité des gaz de combustion x 8,30 - 717.

B Modèle prévisionnel pour les dioxines (ng/m³N à 12 % de CO_2)

3 meilleures variables de surveillance (avec NO_x)

Variables	Unités	1	2	3	4
r^2		0,51	0,69	0,72	0,72
Monoxyde de carbone	ppm	1,55	1,53	1,66	1,66
Température dans le bas de la chambre de rayonnement	°C		- 0,58	- 0,793	- 0,815
Humidité des gaz de combustion	%			19,4	18,5
Teneur en oxygène des gaz de combustion (sec)	%				- 2,03
Coordonnée à l'origine		22,1	577	492	548
C(p)		5,15	2,00	3,00	5,00

Équation prévisionnelle du meilleur ajustement.
DDPC totales = Monoxyde de carbone x 1,66 - température dans le bas de la chambre de rayonnement x 0,793 + humidité des gaz de combustion x 19,4 + 492.

C Modèle de contrôle pour les dioxines (ng/m³N à 12 % de CO_2)

3 meilleures variables de surveillance

Variables	Unités	1	2	3	4
r^2		0,77	0,82	0,89	0,89
Débit air primaire	m^3/mn	0,93			
Apport total d'air	m^3/mn		0,59	0,694	0,70
Rapport air primaire/air secondaire			28,60	32,6	30,50
Production de vapeur	t/h		- -	7,85	- 7,67
Rapport air secondaire avant/arrière				-	15,70
Débit air secondaire	m^3/mn				
Coordonnée à l'origine		-260	- 324	- 190	- 192
C(p)		4,65	3,77	1,54	3,37

Équation de contrôle du meilleur ajustement.
DDPC totales = Apport total d'air x 0,694 + rapport air primaire/air secondaire x 32,6 - production de vapeur x 7,85 - 190.

la teneur en oxydes d'azote, il semblerait qu'une hausse de la température dans le bas de la chambre de rayonnement ou qu'une augmentation de la teneur en monoxyde de carbone ou de l'humidité des gaz pourraient avoir le même effet. Le modèle de contrôle au tableau 6.8C indique qu'un apport accru d'air de combustion total ou qu'un rapport plus élevé air primaire/air secondaire pourraient aussi accroître les émissions de dioxines. Si l'on se fie à ces résultats, la modélisation peut être un moyen efficace d'utiliser tant des variables de fonctionnement que des variables de surveillance pour prévoir et limiter les émissions de dioxines.

6.4.3 Furannes

Modèle prévisionnel. - Le modèle prévisionnel des teneurs en furannes qui tenait compte des teneurs en oxydes d'azote a donné une valeur très élevée de r^2 (0,90). Ce modèle fait intervenir les trois variables utilisées pour prévoir les teneurs en dioxines, soit la teneur en oxydes d'azote, la teneur en monoxyde de carbone et le pourcentage d'humidité des gaz de combustion (voir la figure 6.8 et le tableau 6.9). D'après la figure 6.8A, le modèle prévisionnel s'ajuste étroitement aux données, comme l'indiquent l'étroitesse de la bande résiduelle et l'uniformité de la distribution des résiduels sur toute la longueur de la droite.

Le modèle prévisionnel qui excluait les teneurs en oxydes d'azote a donné une valeur de r^2 plus faible (0,81), mais malgré tout encore très bonne, que celle obtenue avec le modèle qui en tenait compte. Ce modèle n'a utilisé que deux variables: la teneur en monoxyde de carbone et la température dans le bas de la chambre de rayonnement. Ces deux variables ont été également choisies pour les dioxines lorsque l'on ne tenait pas compte des oxydes d'azote. Contrairement à ce que l'on avait noté pour les dioxines, l'humidité des gaz de combustion n'augmentait pas de façon significative le pouvoir de prévision du modèle lorsqu'on faisait intervenir cette variable.

Modèle de contrôle. - Le modèle de contrôle des teneurs en furannes présenté à la figure 6.8B a donné une valeur de r^2 élevée (0,84) et utilisait les trois mêmes variables que pour les dioxines, soit le rapport air primaire/air secondaire, l'apport total d'air de combustion et la production de vapeur.

À l'instar des dioxines, les quatre points représentant de mauvaises conditions de fonctionnement sont regroupés dans le coin supérieur droit des graphiques, ce qui confirme qu'il faut s'attendre à des émissions accrues de furannes dans ce cas.

6.4.4 Chlorophénols et chlorobenzènes

Modèle prévisionnel. - Le modèle prévisionnel qui tenait compte des teneurs en oxydes d'azote a donné les meilleures valeurs de r^2 (0,86 pour les chlorophénols et 0,87

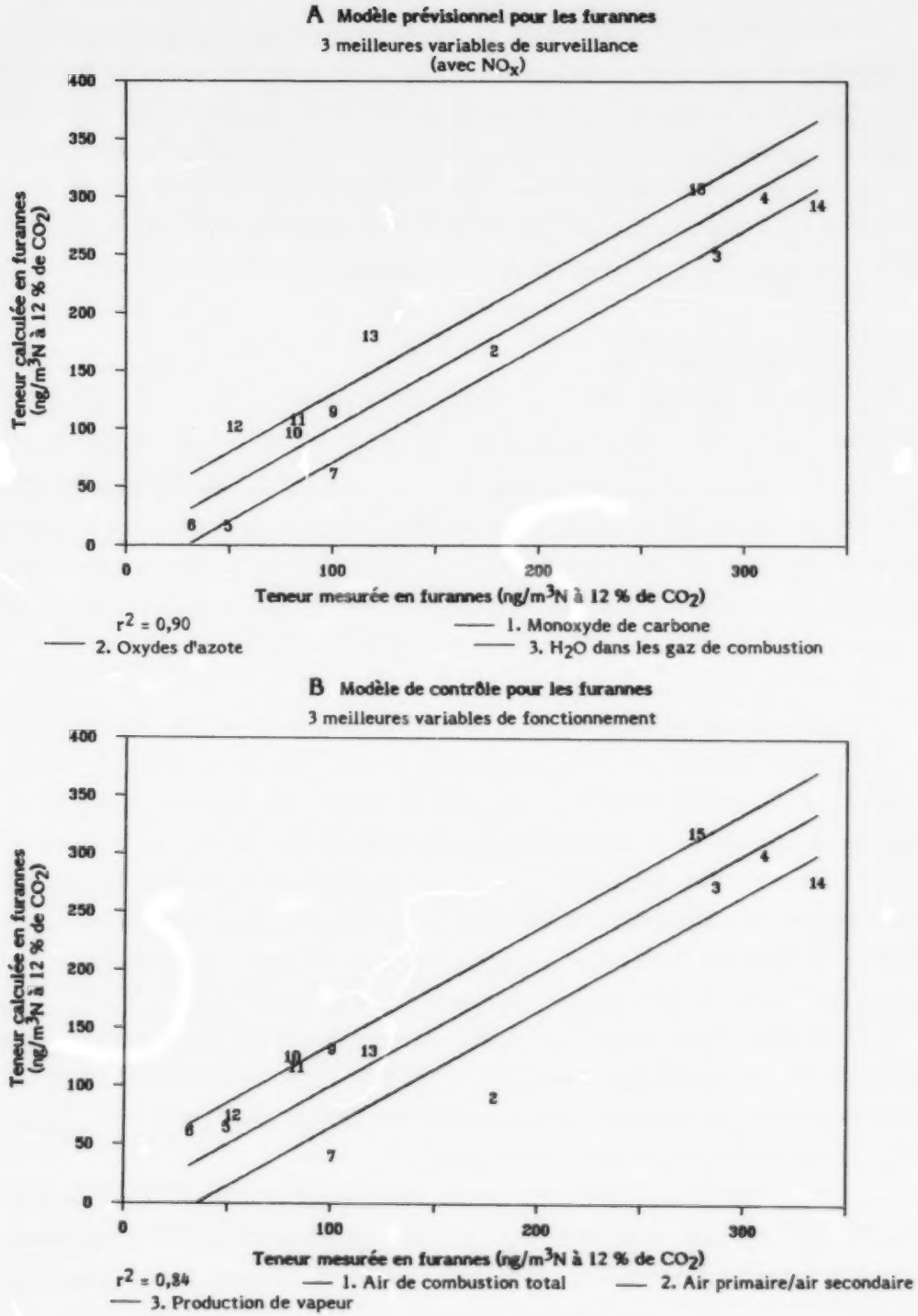


FIGURE 6.8 CORRÉLATIONS TROUVÉES POUR LES FURANNES

TABLEAU 6.9 ANALYSE DE RÉGRESSION MULTIPLE POUR LES MODÈLES RELATIFS AUX FURANNES

A Modèle prévisionnel pour les furannes (ng/m³N à 12 % de CO_2)

3 meilleures variables de surveillance (avec NO_x)

Variables	Unités	1	2	3	4
r^2		0,61	0,88	0,90	0,90
Monoxyde de carbone	ppm	1,70	1,68	1,68	1,63
Oxydes d'azote	ppm		2,51	1,90	1,95
Température dans le bas de la chambre de rayonnement	°C			- 0,264	- 0,182
Humidité des gaz de combustion	%				- 6,66
Teneur en oxygène des gaz de combustion (sec)	%				
Coordonnée à l'origine		49,7	- 450	- 76,1	- 66,9
C(p)		27,3	4,20	4,33	5,96

Équation prévisionnelle du meilleur ajustement.
DFPC totaux = Monoxyde de carbone x 1,68 + oxydes d'azote x 1,90 - température dans le bas de la chambre de rayonnement x 0,264 - 76,1.

B Modèle de contrôle pour les furannes (ng/m³N à 12 % de CO_2)

3 meilleures variables de fonctionnement

Variables	Unités	1	2	3	4
r^2		0,55	0,74	0,84	0,86
Débit air primaire	m³/mn	0,79			- 0,724
Rapport air primaire/ air secondaire			63,80	39,9	58,8
Débit air secondaire	m³/mn		1,12		
Apport total d'air	m³/mn			0,591	1,04
Production de vapeur	t/h			- 10,3	- 10,20
Rapport air secondaire avant/arrière					
Coordonnée à l'origine		- 166	- 261	- 39,4	- 78,6
C(p)		14,1	6,47	3,30	4,01

Équation de contrôle du meilleur ajustement.
DFPC totaux = Apport total d'air x 0,591 + rapport air primaire/air secondaire x 39,9 - production de vapeur x 10,3 - 39,4.

pour les chlorobenzènes). En plus de deux des variables utilisées pour prévoir les teneurs en dioxines et en furannes, c'est-à-dire teneur en oxydes d'azote et teneur en monoxyde de carbone, on a fait intervenir la température dans le bas de la chambre de rayonnement dans le modèle relatif aux chlorophénols, et la teneur en oxygène des gaz de combustion, dans celui applicable aux chlorobenzènes. Tout comme on l'avait noté pour les dioxines et les furannes, les modèles qui ne tenaient pas compte des teneurs en oxydes d'azote ont présenté une moins bonne corrélation que les modèles où cette variable entrait en jeu.

Modèle de contrôle. - Le modèle de contrôle des teneurs en chlorophénols et en chlorobenzènes a donné des valeurs de r^2 plus faibles mais malgré tout bonnes (0,77 et 0,82 respectivement) avec deux des trois variables utilisées pour le modèle de contrôle applicable aux dioxines, soit le rapport air primaire/air secondaire et l'apport total d'air de combustion. Pour les chlorophénols, on a fait intervenir la production de vapeur comme troisième variable et dans le cas des chlorobenzènes, on a utilisé le rapport air secondaire avant/arrière de façon à obtenir un bon ajustement.

6.4.5 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et biphényles polychlorés (BPC)

Modèle prévisionnel. - Les modèles de régression pour les HAP et les BPC ont présenté un certain nombre de similitudes, et se distinguent nettement de ceux des dioxines, des furannes, des chlorophénols ou des chlorobenzènes. La seule caractéristique commune avec les autres composés organiques est le fait que les meilleurs modèles prévisionnels sont ceux qui tiennent compte des teneurs en oxydes d'azote. Contrairement aux modèles élaborés pour les autres composés organiques, ces modèles n'ont pas retenu la teneur en monoxyde de carbone comme variable. Les deux modèles prévisionnels considéraient trois variables: teneur en oxydes d'azote, teneur en oxygène et température dans le bas de la chambre de rayonnement. Ils ont donné des valeurs de r^2 relativement élevées (0,73 et 0,62 respectivement). Cependant, malgré ces valeurs très acceptables, les modèles ne peuvent servir à prédire adéquatement les teneurs, car les points correspondant aux essais conduits dans des conditions de fonctionnement bonnes et mauvaises sont dispersés de façon aléatoire sur le graphique.

Les modèles prévisionnels qui excluaient les teneurs en oxydes d'azote ont donné des valeurs du r^2 relativement faibles (0,41 et 0,28 respectivement); les variables utilisées étaient la température dans le bas de la chambre de rayonnement ainsi que les teneurs en oxygène et en monoxyde de carbone. Ces valeurs ont été jugées trop faibles et l'on a rejeté ces modèles. On n'a trouvé aucun modèle de remplacement approprié pour les HAP et les BPC.

Modèle de contrôle. - Le modèle de contrôle des teneurs en HAP a donné une assez bonne valeur de r^2 (0,63), alors que celui pour les BPC a donné une valeur très faible (0,27). Ces modèles de contrôle ont été jugés inappropriés et on les a également rejetés.

7 CARACTÉRISATION DES CENDRES

Des organismes gouvernementaux et des groupes de défense de l'environnement ont récemment exprimé leur inquiétude quant à la manipulation et le transport des résidus provenant des incinérateurs municipaux de déchets solides. Pour répondre à ces préoccupations et pour favoriser l'élaboration de directives pour la gestion des cendres, on a soumis des échantillons de cendres prélevés dans l'incinérateur de la CUQ à une série d'essais de caractérisation et à des tests d'extraction des composés organiques. Ce chapitre résume les résultats du programme expérimental réalisé sur des sous-échantillons représentatifs de cendres d'incinération, de cendres volantes de la chaudière et de l'économiseur et de cendres volantes captées par l'électrofiltre. Des échantillons de cendres ont été recueillis pour les cinq modes de fonctionnement retenus pour les essais de performance (voir à ce sujet le chapitre 5). Les échantillons étaient prélevés au cours d'un essai seulement.

7.1 Extractabilité des composés organiques

On a procédé au dosage de divers composés organiques en traces, notamment les dioxines (DDPC), les furannes (DFPC), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les biphényles polychlorés (BPC), les chlorophénols (CP) et les chlorobenzènes (CB). Le tableau 7.1 donne la teneur moyenne en ces composés pour chaque type de cendres et les cinq modes de fonctionnement. À l'exception des HAP, les composés organiques étaient en plus fortes teneurs dans les cendres captées par l'électrofiltre que dans les cendres d'incinération. Il en a d'ailleurs déjà été question au chapitre 5. Cette augmentation pouvait s'expliquer par la nature volatile de la plupart des composés organiques et par la plus grande surface d'adsorption des cendres fines captées par l'électrofiltre.

Les propriétés d'extraction dans des conditions non acides des composés organiques en traces présents dans les cendres ont été déterminées au cours d'un essai d'extraction par lots, à l'eau distillée. Les cendres ont été mises dans un bocal avec de l'eau distillée dans un rapport liquide/solide de 20/1 et on a fait tourner lentement le bocal pendant 18 heures pour bien mélanger le tout. On a ensuite extrait la phase liquide pour le dosage. D'après les résultats résumés au tableau 7.2, il n'y a eu aucune extraction de dioxines, de furannes ou de BPC présents dans les cendres. On a décelé dans les solutions d'extraction des traces de CP (moins de 0,3 parties par milliard (ppb)), de HAP (moins de 0,08 ppb) et de CB (moins de 0,03 ppb). Les chlorobenzènes et les HAP n'étant

TABLEAU 7.1 TENEURS MOYENNES EN COMPOSÉS ORGANIQUES EN TRACES PRÉSENTS DANS LES ÉCHANTILLONS DE CENDRES PRÉLEVÉS POUR LES ESSAIS D'EXTRACTION

	Teneur (ng/g)		
Composé organique	Cendres d'incinération	Cendres volantes - chaudière/ économiseur	Cendres volantes - électrofiltre
DDPC	0,03	58,6	718
DFPC	n.d.	43,2	244
HAP	388	71,6	239
CP	13,7	124	2300
CB	5,25	526	1510
BPC	n.d.	n.d.	5,8

n.d. = Non détecté.

TABLEAU 7.2 TENEURS MOYENNES EN COMPOSÉS ORGANIQUES DE LA SOLUTION D'EXTRACTION

	Teneur (ppb)		
Composé organique	Cendres d'incinération	Cendres volantes - chaudière/ économiseur	Cendres volantes - électrofiltre
Dioxines	n.d.	n.d.	n.d.
Furannes	n.d.	n.d.	n.d.
HAP	0,08	0,02	0,01
Chlorophénols	0,14	0,24	0,14
Chlorobenzènes	0,01	0,03	0,02
BPC	n.d.	n.d.	n.d.

n.d. = Non détecté.

pas hydrosolubles, on suppose que ces composés étaient liés à des particules ultrafines qui ont traversé les filtres en fibre de verre utilisés durant le traitement de l'échantillon et qu'ils sont restés en suspension dans la solution d'extraction.

Même si ces résultats révèlent une mobilité limitée des composés organiques lorsque les cendres sont en contact avec l'eau, cet essai ne peut servir à prédire s'il y a risque de lixiviation des composés organiques dans les conditions d'une décharge contrôlée. L'activité microbienne, la production d'acides organiques, la présence de solvants ou la migration de particules colloïdales peuvent changer du tout au tout la mobilité de certains de ces composés. On met actuellement au point des essais d'extraction spécifiques aux composés organiques afin d'obtenir les données nécessaires pour évaluer la mobilité des polluants organiques dans des conditions plus représentatives de l'élimination en décharge.

7.2 Extractabilité des métaux

Avant de procéder aux essais d'extraction, on avait aussi dosé le bore, le cadmium, le chrome, le cobalt, le cuivre, le plomb, le nickel et le zinc. La figure 7.1 présente les teneurs moyennes des cendres en métaux. En général, les résultats se comparent à ceux obtenus dans des études précédentes conduites dans le cadre du PNEEI; les teneurs en bore, cadmium, chrome, cobalt, cuivre et nickel allaient d'assez modérées à moyennes alors qu'elles étaient très élevées pour le plomb et le zinc dans les trois types de cendres. La répartition des métaux dans les cendres dépend de la volatilité du métal recherché. En général, les métaux les plus volatils comme le cadmium, le plomb et le zinc se trouvaient en teneurs plus élevées dans les cendres volantes de l'électrofiltre, alors que des métaux moins volatils comme le chrome, le cobalt et le nickel se retrouvaient principalement dans les cendres d'incinération.

Les caractéristiques d'extraction des métaux présents dans les cendres ont été déterminées au moyen de trois procédés, soit le procédé d'extraction par lots séquentiels multiples (PELSM), un procédé d'extraction chimique séquentielle (ECS) et l'essai d'extraction exigé par le Règlement 309 du gouvernement de l'Ontario. Le tableau 7.3 décrit brièvement ces essais.

On a constaté que les deux types de cendres volantes étaient très solubles dans l'eau; pratiquement 40 p. 100 des cendres volantes de l'électrofiltre et 25 p. 100 des cendres volantes de la chaudière et de l'économiseur avaient été dissoutes au cours des cinq cycles du PELSM. En revanche, seulement 4 p. 100 des cendres d'incinération l'avaient été au cours de la même période (voir figure 7.2). La solubilité élevée des cendres volantes captées par l'électrofiltre était due au pH des cendres, aux teneurs élevées en sels très solubles et à la petite taille des particules. La figure 7.3 illustre les effets du pH de la solution d'extraction sur la solubilité du cadmium et du zinc présents dans les cendres volantes captées par l'électrofiltre. La solubilité plus faible des cendres

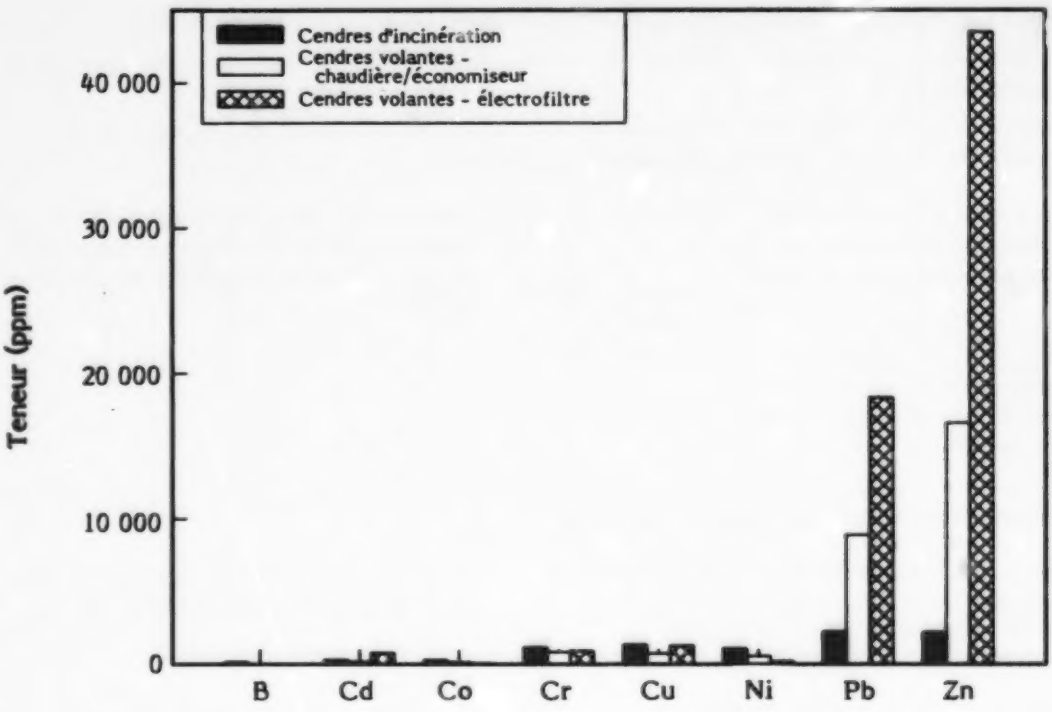


FIGURE 7.1 TENEURS MOYENNES DES CENDRES EN MÉTAUX LOURDS

d'incinération et des cendres volantes de la chaudière et de l'économiseur a été attribuée à leur pH alcalin et à la présence de silicates et d'oxydes relativement insolubles.

Ce résumé donne les résultats pour les trois métaux les plus extractibles par extraction chimique séquentielle, soit le cadmium, le plomb et le zinc. Sur demande, Environnement Canada fournira les résultats pour les autres métaux. D'après la figure 7.4, environ la moitié du plomb et du zinc présents en teneurs relativement faibles dans les cendres d'incinération pourrait devenir extractible à long terme. Le même phénomène s'applique au cadmium, au plomb et au zinc présents dans les cendres volantes de la chaudière, de l'économiseur et de l'électrofiltre, mais les quantités extractibles sont par contre beaucoup plus importantes. Ceci s'explique par le fait que les cendres volantes renfermaient des teneurs élevées en sels métalliques très solubles, notamment de cadmium et de zinc, tandis que les cendres d'incinération étaient constituées principalement d'oxydes métalliques et de silicates relativement insolubles.

Les résultats de l'essai d'extraction du Règlement 309 du gouvernement de l'Ontario (tableau 7.4) ont révélé que les seules teneurs en accord avec les objectifs de la

TABLEAU 7.3 RÉSUMÉ DES ESSAIS D'EXTRACTION

Description	Interprétation
Procédé d'extraction par lots séquentiels multiples	
Extraction à l'eau distillée, rapport liquide/solide de 20/1, mélanger lentement pendant 18 heures.	Utiliser les résultats pour faciliter la détermination des espèces de métaux et la fraction disponible pour l'extraction à l'eau.
Récupérer les solides et les faire passer dans un nouveau milieu d'extraction. Répéter durant cinq cycles.	
Procédé d'extraction chimique séquentielle	
Fraction A - Faire digérer l'échantillon broyé par LiCl/CsCl 1 *M* dans CH_3OH à 60 p. 100 - le résidu constitue la fraction B.	Fraction traitable par échange d'ions. Risque de lixiviation immédiate.
Fraction B - CH_3COONa 1 *M* avec de l'acide acétique - pH 5 - le résidu constitue la fraction C.	Ions liés à des oxydes et des carbonates en surface. Risque de lixiviation dans des conditions acides.
Fraction C - NH_2OH . HCl 1 *M* dans de l'acide acétique à 25 p. 100 - le résidu constitue la fraction D.	Ions métalliques liés à du fer et du manganèse. Risque de lixiviation dans les conditions plus corrosives d'une décharge contrôlée en opération depuis assez longtemps.
Fraction D - Acide nitrique avec du peroxyde - chauffer, ajouter du CH_3OONH_4 dans de l'acide nitrique à 20 p. 100 - le résidu constitue la fraction E.	Ions métalliques liés à des sulfures et à des matières organiques. Lixiviation improbable dans les conditions normales d'une décharge contrôlée.
Fraction E - Eau régale/HF en présence de peroxyde et de HCl.	Ions métalliques résiduels. Lixiviation improbable.
Essai d'extraction, Règlement 309 du gouvernement de l'Ontario (semblable à l'essai EP TOX de l'EPA).	
Extraire dans un rapport liquide/solide de 20/1 avec un volume max. d'acide acétique 0,5 *N* pour maintenir le pH à < = 5.	Les résultats ont été comparés à 100 fois les objectifs de l'Ontario pour la qualité de l'eau potable.

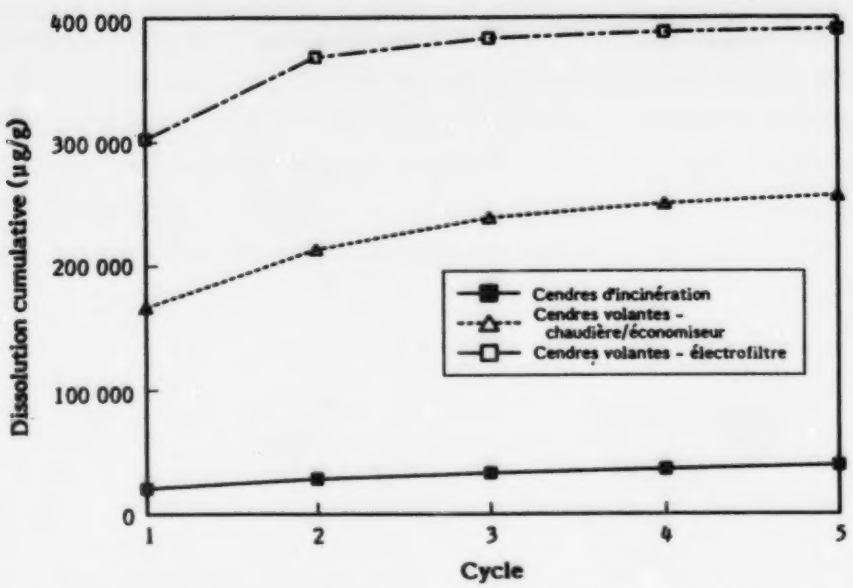


FIGURE 7.2 TENEURS MOYENNES CUMULATIVES DES MSD TOTALES LIBÉRÉES À L'EXTRACTION PAR LOTS SÉQUENTIELS MULTIPLES

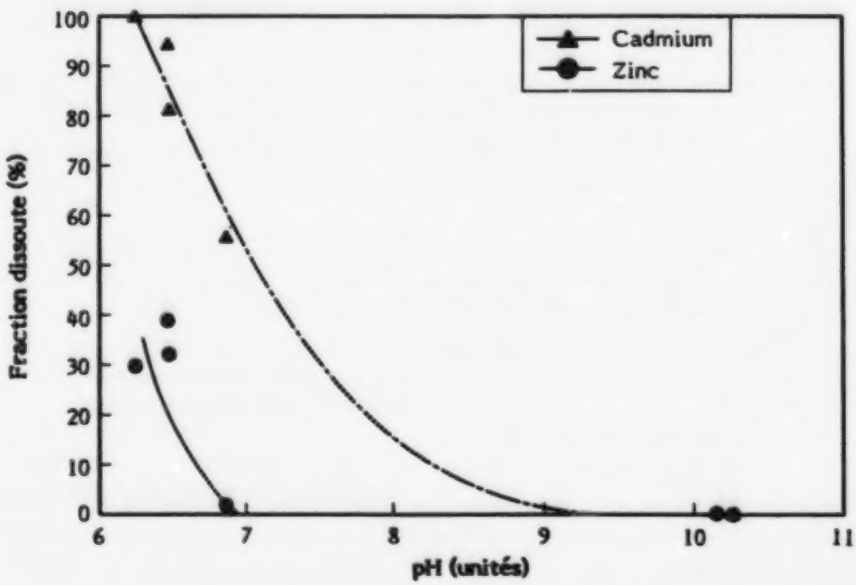


FIGURE 7.3 EFFETS DU pH SUR LA SOLUBILITÉ DU CADMIUM ET DU ZINC PRÉSENTS DANS LES CENDRES VOLANTES CAPTÉES PAR L'ÉLECTROFILTRE

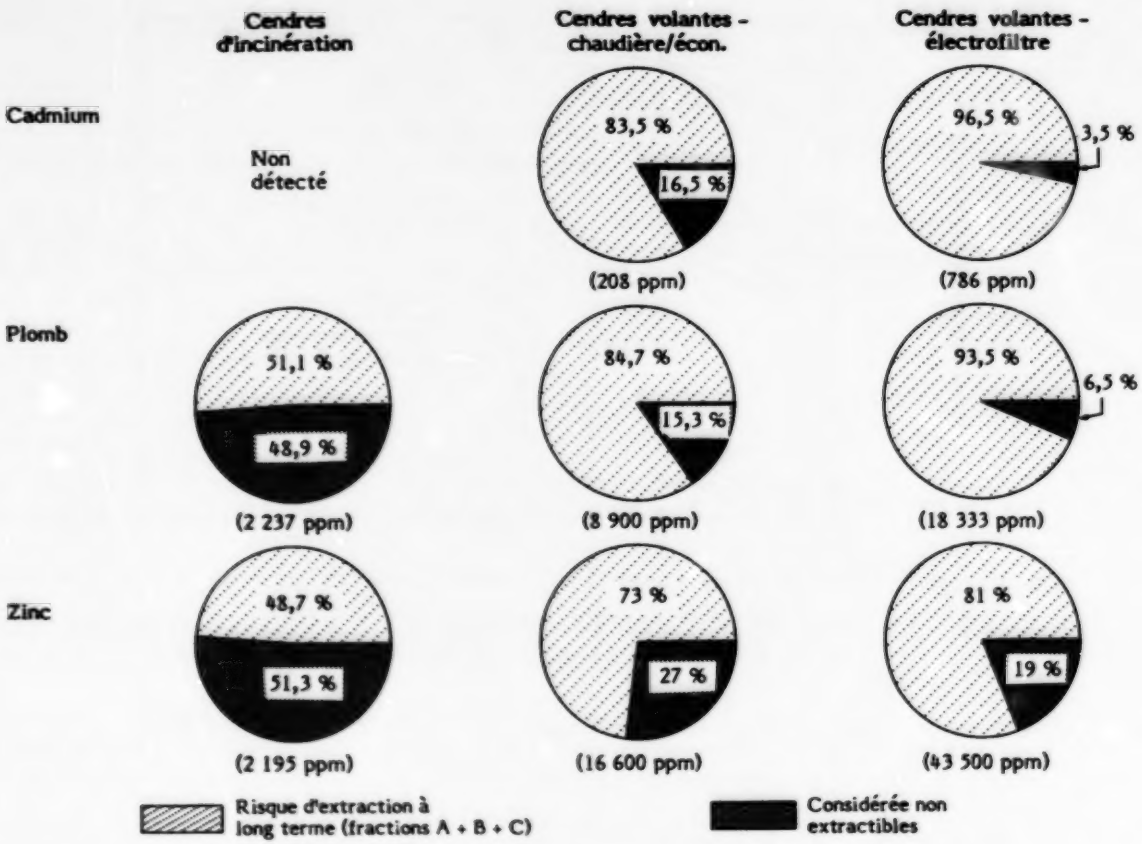


FIGURE 7.4 RÉSULTATS DES ANALYSES D'EXTRACTION CHIMIQUE SÉQUENTIELLE POUR IDENTIFIER LES FRACTIONS EXTRACTIBLES À LONG TERME

TABLEAU 7.4 RÉSULTATS DES ESSAIS D'EXTRACTION (RÈGLEMENT 309 DE L'ONTARIO) SUR LES CENDRES VOLANTES DE LA CHAUDIÈRE, DE L'ÉCONOMISEUR ET DE L'ÉLECTROFILTRE

Paramètre	Objectifs de qualité de l'eau potable x 100 (ppm)	Teneurs moyennes dans la solution d'extraction (ppm)	
		Cendres volantes - chaudière/économiseur	Cendres volantes - électrofiltre
Cadmium	0,5	6,84	28,3
Plomb	5,0	40,0	35,9
Zinc	500	363	1590

qualité de l'eau dans cette province se rapportent au zinc dans les cendres volantes de la chaudière et de l'économiseur. Les teneurs en cadmium, en plomb et en zinc des solutions d'extraction des cendres volantes provenant de la chaudière et de l'économiseur ainsi que celles captées par l'électrofiltre étaient au moins trois fois supérieures aux niveaux réglementaires (57 fois supérieures dans le cas du cadmium). Par conséquent, les cendres volantes seraient considérées comme dangereuses en vertu du Règlement 309 de l'Ontario.

8 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

8.1 Essais de performance

8.1.1 Programme d'essais

1) Les émissions de dibenzo-p-dioxines polychlorées (19 ng/m^{3}N) et de dibenzofurannes polychlorés (44 ng/m^{3}N) dans de bonnes conditions de fonctionnement au rythme d'enfournement nominal, se situaient dans la plage inférieure des valeurs signalées dans la documentation (14) pour les incinérateurs de déchets non conditionnés dotés d'électrofiltres.

2) Les résultats des essais ont révélé que la configuration du four pouvait fortement influencer les émissions de dioxines (DDPC) et de furannes (DFPC). Les émissions de dioxines et de furannes par l'unité modifiée étaient bien inférieures aux émissions mesurées lors des essais conduits par le gouvernement du Québec en décembre 1985 (donc avant modifications), qui s'élevaient en moyenne à 1985 ng/m^{3}N pour les DDPC et à 476 ng/m^{3}N pour les DFPC.

3) D'après les données recueillies, les conditions de fonctionnement de l'incinérateur peuvent influencer les émissions dioxines et de furannes. Celles-ci étaient nettement plus élevées lors des mauvaises conditions de fonctionnement au rythme d'enfournement nominal et ont atteint entre 219 et 299 ng/m^{3}N dans le cas des DDPC, et entre 298 et 306 ng/m^{3}N dans celui des DFPC.

4) La teneur en monoxyde de carbone des gaz constituait une bonne indication du fonctionnement du système. Lors de conditions permettant de limiter les émissions de CO à moins de 50 ppm et de maintenir une production de vapeur constante, la teneur des émissions en composés organiques était faible.

5) Les prélèvements par échantillonneur à grand débit, effectués avant et après les modifications apportées à l'unité n^o 4, ont révélé que les améliorations avaient permis d'abaisser de pratiquement vingt fois les émissions de particules. Ceci confirme que la configuration du four et les conditions de fonctionnement ont un effet marqué sur les rejets de particules tout comme elles influencent les émissions de DDPC et DFPC. La comparaison des mesures des particules antérieures à 1984 (c'est-à-dire avant modification de l'unité n^o 4) et des mesures faites après que l'unité ait été modifiée, indique également une baisse des teneurs en particules significative quoi que plus faible.

6) Les analyses d'échantillons multiples d'ordures ont indiqué que la composition de ces dernières variait considérablement avec le temps. Des analyses multiples de tous les échantillons prélevés ont démontré que la répétabilité était acceptable pour la plupart des composés.

7) Les émissions d'acide chlorhydrique (HCl) étaient comprises entre 366 et 565 ppm, plage de valeurs caractéristique pour les installations semblables en Amérique du Nord (14) où l'on ne procède pas à l'épuration des gaz acides.

8) L'étude attentive de la granulométrie montre qu'il n'existe aucune relation entre la granulométrie et le mode de fonctionnement.

9) C'est dans les cendres volantes captées par l'électrofiltre qu'on a trouvé les plus fortes teneurs en composés organiques et en métaux d'intérêt prioritaire (pour la plupart d'entre eux). Les teneurs étaient nettement plus importantes que celles mesurées dans les cendres provenant de la chaudière et de l'électrofiltre, teneurs qui à leur tour étaient supérieures à celles des cendres d'incinération.

10) Lors d'un essai d'extraction par lots, on a constaté que la mobilité des composés organiques était limitée lorsque les cendres étaient mises en contact avec de l'eau. D'après les résultats, les dioxines, furannes et biphényles polychlorés présents dans les cendres n'ont pas été extraits. On a décelé dans les solutions d'extraction des traces de chlorophénols, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques et de chlorobenzènes.

11) D'après les résultats des essais d'extraction par lots séquentiels multiples, les cendres volantes sont fortement hydrosolubles alors que les cendres d'incinération ne le sont que légèrement.

12) Des quantités importantes de cadmium, de plomb et de zinc ont été mesurées dans les solutions d'extraction des essais faits avec des cendres volantes de l'économiseur et de l'électrofiltre, et il ne faut pas exclure le risque de lixiviation de ces métaux à long terme dans les décharges.

8.1.2 Régression simple. - On a examiné plus de 20 000 corrélations linéaires simples. Les plus importantes sont résumées ci-dessous.

1) On a obtenu de fortes corrélations entre les émissions de dioxines et de furannes et les paramètres suivants:

   a. émissions de monoxyde de carbone;

b. émissions de particules;
c. débit des gaz évacués et débit d'air primaire;
d. émissions de chlorobenzènes (CB) et de chlorophénols (CP);
e. émissions de cuivre.

2) On n'a trouvé aucune corrélation entre les émissions de dioxines et de furannes et:
a. la teneur des ordures en dioxines et en furannes;
b. les émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques et de biphényles polychlorés.

3) Les émissions de particules étaient en corrélation avec:
a. les émissions de monoxyde de carbone;
b. le débit des gaz évacués et le débit d'air primaire;
c. les émissions de certains composés organiques en traces, soit les dioxines, les furannes et les chlorobenzènes;
d. les émissions de la plupart des métaux d'intérêt prioritaire, par exemple cadmium, cuivre et plomb.

4) On a obtenu de bonnes corrélations entre les teneurs en métaux d'intérêt prioritaire désignés et les teneurs en chlorobenzènes, chlorophénols, dioxines et furannes. Ces corrélations sont, croit-on, attribuables au fait que ces polluants sont généralement associés aux particules; les teneurs fluctueront toujours en fonction de la charge en particules. On n'a trouvé aucune corrélation entre les composés organiques en traces et les émissions de mercure.

5) On a obtenu une bonne corrélation entre la température dans le bas de la chambre de rayonnement et certains paramètres de la combustion comme les teneurs en oxygène et en dioxyde de carbone. Les teneurs en oxygène étaient inversement proportionnelles aux températures du procédé tandis que les teneurs en dioxyde de carbone étaient directement proportionnelles à ces températures.

6) Il y avait corrélation entre le débit d'air primaire et:
a. la teneur en particules à l'entrée de l'électrofiltre;
b. les émissions de composés organiques en traces (dioxines, furannes, chlorophénols, chlorobenzènes);
c. les émissions de métaux (cadmium, cuivre, nickel, antimoine, chrome et zinc) à l'entrée de l'électrofiltre.

7) La corrélation entre le débit d'air secondaire et les émissions de composés organiques en traces, de particules et de métaux était médiocre.

8) Même si on a obtenu des corrélations élevées entre les émissions de monoxyde de carbone et celles de dioxines, de furannes, de chlorobenzènes et de chlorophénols, on n'a observé aucune corrélation lorsque l'on comparait le monoxyde de carbone avec le débit d'air primaire et le débit des gaz de combustion.

9) On a obtenu une bonne corrélation entre l'excès d'air e tous les paramètres du procédé mais aucune corrélation entre l'excès d'air et les émissions de composés organiques en traces et les émissions de métaux.

10) On a obtenu des corrélations élevées entre les teneurs en chrome, en cuivre et en nickel des cendres volantes captées par l'électrofiltre et les taux d'émission de dioxines, de furannes, de chlorobenzènes et de chlorophénols. Ces corrélations portent à croire qu'il est possible de prévoir les émissions de composés organiques en traces en mesurant la quantité de cendres captées par l'électrofiltre et leur teneur en métaux.

11) On a obtenu des corrélations médiocres entre les paramètres suivants:

a. températures de la chambre de combustion et émissions d'oxydes d'azote;
b. émissions d'acide chlorhydrique et teneurs en chlore des ordures;
c. émissions d'acide chlorhydrique et émissions de composés organiques en traces.

8.1.3 **Régression multiple.** - Les modèles de régression simple à une variable s'étant en général avérés un bon moyen d'estimation du premier ordre pour soit limiter les émissions de composés organiques en traces ou les prévoir, on a par conséquent, effectué des analyses de régression linéaire multiple. Les principaux résultats sont exposés ci-dessous.

1) L'analyse de régression linéaire multiple des données concernant les essais effectués à Québec a permis d'obtenir des modèles permettant de prévoir et de limiter les émissions de composés organiques en traces. Les coefficients de détermination, qui sont des indices de l'efficacité du modèle, étaient compris entre 0,74 et 0,90 dans le cas des modèles de régression linéaire multiple du meilleur ajustement.

2) Les modèles prévisionnels qui caractérisaient le mieux les émissions de dioxines, de furannes, de chlorobenzènes et de chlorophénols, utilisaient deux ou trois des paramètres de surveillance suivants:

a. monoxyde de carbone;

b. oxydes d'azote;
c. oxygène;
d. humidité des gaz de combustion;
e. température dans le bas de la chambre de rayonnement.

3) Les meilleurs modèles de contrôle pour réduire au minimum les émissions de composés organiques en traces faisaient appel à trois des paramètres de fonctionnement suivants:
   a. débit de l'air total;
   b. rapport air primaire/air secondaire;
   c. production de vapeur ou rythme d'enfournement;
   d. rapport de l'air secondaire avant/arrière.

4) On a déterminé que la teneur en monoxyde de carbone était la meilleure variable de remplacement dans le modèle prévisionnel (régression simple) à variable unique pour la plupart des composés organiques en traces, à l'exception des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des biphényles polychlorés.

5) Même si la teneur en oxydes d'azote constituait la deuxième meilleure variable permettant d'améliorer la capacité de prévision des modèles, on n'a pas encore bien compris son importance.

6) Si l'on exclut la teneur en oxydes d'azote dans les modèles prévisionnels, les variables suivantes seraient, par ordre d'importance, la température dans le bas de la chambre de rayonnement, le pourcentage d'oxygène ou d'humidité dans les gaz de combustion.

7) Le débit d'air primaire était la variable de fonctionnement influant le plus sur les modèles de contrôle à une variable applicables aux dioxines, aux furannes, aux chlorobenzènes et aux chlorophénols.

8) Les modèles relatifs aux biphényles polychlorés et aux hydrocarbures aromatiques polycycliques examinés présentaient soit un coefficient de détermination relativement faible, soit une dispersion des données signifiant que le modèle prévisionnel était médiocre.

9) Les modèles élaborés pour les dioxines, les furannes, les chlorobenzènes et les chlorophénols confirment que lors de mauvaises conditions de fonctionnement ces composés se retrouvent en teneurs plus élevées dans les émissions.

8.2 Combustion et fonctionnement

1) La teneur des émissions en polluants était relativement faible dans de bonnes conditions de fonctionnement aux trois taux de production de vapeur étudiés (c.-à-d. 20, 28 et 32 t/h - soit "faible", "nominal" et "élevé" respectivement). Pour que le fonctionnement soit considéré bon, il fallait:

   a. maintenir des teneurs relativement faibles et constantes en monoxyde de carbone;
   b. maintenir une bonne distribution entre l'air primaire et l'air secondaire;
   c. maintenir une couche pas trop épaisse sur les trois jeux de grilles ainsi qu'un bon profil de combustion;
   d. éliminer la formation de bouchons en réglant bien l'allure des grilles;
   e. éviter l'accumulation de scories sur les parois en réfractaire car cela réduit la surface efficace des grilles;
   f. éviter le plus possible que les flammes atteignent les tubes écrans à l'entrée de la chaudière;
   g. maintenir une bonne distribution de l'air primaire vers toutes les grilles.

2) Les tentatives pour améliorer la qualité des cendres (c.-à-d. aucun imbrûlé visible) en utilisant un débit élevé d'air primaire et un faible débit d'air secondaire ont provoqué une augmentation significative des émissions.

3) D'après les observations à l'oeil nu, l'injection d'un trop fort pourcentage d'air primaire total sous la section avant de la grille de combustion principale détachait des particules et augmentait l'entraînement de particules incandescentes dans le haut de la chambre de rayonnement. En outre, plus la quantité d'air dirigée vers cette zone augmentait, plus les flammes atteignaient les tubes écrans de la chaudière.

4) L'injection sous la grille d'achèvement de la combustion d'un pourcentage d'air primaire total supérieur à la normale se traduisait par de basses températures dans le haut de la chambre de rayonnement et un important excès d'air provoqués par l'absence de matières combustibles sur cette grille. On a par conséquent diminué le pourcentage d'air primaire dirigé vers la section avant de cette grille, ce qui a eu pour effet d'entraver la combustion dans cette zone. De ce fait, l'épaisseur de la couche de matières en combustion sur cette grille a augmenté et la qualité des cendres a diminué (c.-à-d. que l'on retrouvait plus d'imbrûlés dans la cuve d'extinction).

5) La formation de scories sur les parois dans le bas du four était provoquée, semble-t-il, par des débits d'air primaire excessifs. Ceci se produisait généralement lorsque les températures au sommet du four (autrement dit dans le haut de la chambre de rayonnement) étaient basses. En cas de débits d'air primaire trop élevés, la quantité de particules soulevées ainsi que la température dans les zones inférieures du four augmentaient, ce qui favorisait la formation de scories sur les parois à proximité de la grille de combustion principale.

6) L'épaisseur du lit sur la grille de combustion principale détermine indirectement l'apport d'air primaire. Par exemple, lorsque l'on doit produire une quantité donnée de vapeur, l'apport d'air primaire sera moins important si la couche d'ordures est épaisse. Ce faisant, la combustion est incomplète et la quantité d'imbrûlés dans les cendres augmente. Comme on le voit, l'épaisseur du lit constitue un paramètre important pour contrôler l'efficacité de la combustion, les émissions et la qualité des cendres.

7) Le changement subit de l'allure des grilles provoquait pour une courte période des émissions accrues de monoxyde de carbone. Dans les conditions de réglage automatique, on a enregistré une accélération soudaine de l'allure des grilles lorsque la demande en vapeur diminuait.

8) L'examen à l'oeil nu des cendres d'incinération a permis de constater qu'elles étaient de meilleure qualité (c.-à-d. qu'elles contenaient moins d'imbrûlés) lorsque l'allure de la grille d'achèvement de la combustion était réglée manuellement plutôt qu'automatiquement.

8.3 Recommandations

1) Effectuer une analyse statistique supplémentaire des relations non linéaires des données recueillies lors des essais conduits aux installations de la CUQ dans le cadre du PNEEI, pour tenter d'élaborer d'autres modèles et mieux comprendre les interrelations entre les émissions et les paramètres du procédé. Plus spécifiquement, une étude plus approfondie des données sur les composés organiques devrait permettre de se faire une idée des mécanismes de formation et de destruction des composés organiques, ce qui faciliterait l'élaboration de méthodes d'opération normalisées afin d'en réduire considérablement les émissions.

2) Effectuer des études plus poussées pour mieux comprendre la relation entre le monoxyde de carbone, les températures de combustion, les débits d'air primaire et

les distributions de l'air, afin de faciliter l'élaboration de lignes directrices sur les incinérateurs de déchets municipaux non conditionnés.

RÉFÉRENCES

1. Rapport du Comité consultatif mixte de Santé et Bien-être social Canada et d'Environnement Canada sur les dioxines. Ottawa, novembre 1983.
2. Environnement Canada. *Le programme national d'essais et d'évaluation des incinérateurs: Sommaire des essais à l'incinérateur à combustion en deux étapes de Parkdale, Île-du-Prince-Édouard.* Rapport SPE 3/UP/1, Ottawa, novembre 1985.
3. Environnement Canada. *Le programme national d'essais et d'évaluation des incinérateurs: Sommaire des techniques de dépollution des gaz de combustion.* Rapport SPE 3/UP/2F, Ottawa, septembre 1986.
4. Environnement Canada. *Méthodes de référence normalisées en vue d'essais aux sources: Mesure des émissions de particules provenant de sources fixes.* Rapport EPS 1-AP-74-1, Ottawa, février 1974.
5. Environnement Canada. *Méthodes uniformes de référence pour le contrôle à la source des émissions de mercure par les fabriques de chlore.* Rapport EPS 1-AP-76-1, Ottawa, 1976.
6. Organisation mondiale de la santé. *Émissions de métaux lourds et de HAP par les incinérateurs de déchets solides: Évaluation des effets sur la santé.* Rapport provisoire d'un groupe de travail. Florence, Italie, octobre 1987.
7. Colton, T. *Statistics in Medicine.* Little Brown and Co., 1974, 371 pages.
8. Conseil national de recherches Canada. Communication personnelle.
9. H. Vogg, M. Metz et L. Stieglitz. "Recent Findings on the Formation and Decomposition of PCDD/PCDF in Municipal Solid Waste Incineration". *Waste Management & Research*, vol. 5, n° 3, 1987.
10. L. Stieglitz et H. Vogg. *New Aspects of PCDD/PCDF Formation in Incineration Process.* Actes d'un atelier sur l'incinération des ordures municipales tenu à Montréal en octobre 1987 (parrainé par Environnement Canada).
11. American Society for Testing and Materials. *Draft Method No. 34.02-01123.*
12. J.L. Fraser et K.R. Lum. "Availability of Elements of Environmental Importance in Incinerated Sludge Ash". *Environmental Science and Technology: 17(1),* 1983.
13. Gouvernement de l'Ontario, Règlement 309, modifié jusqu'à 464/85 conformément à la Loi sur la protection de l'environnement (dispositions générales - gestion des déchets), novembre 1985.
14. U.S. Environmental Protection Agency. *Municipal Waste Combustion Study: Emission Data Base for Municipal Waste Combustors.* Rapport préparé par le Midwest Research Institute pour l'Agence étatsunienne de protection de l'environnement, 7 janvier 1987.

ANNEXE

SYMBOLES, ABRÉVIATIONS ET HOMOLOGUES DES DIBENZODIOXINES ET DES DIBENZOFURANNES POLYCHLORÉS

Symboles et abréviations

Préfixes SI

Préfixe	Symbole	Facteur de multiplication		Forme exponentielle
méga	M	1 000 000	=	10^6
kilo	k	1 000	=	10^3
hecto	h	100	=	10^2
déca	da	10	=	10^1
unité	-	1	=	10^0
déci	d	0,1	=	10^{-1}
centi	c	0,01	=	10^{-2}
milli	m	0,001	=	10^{-3}
micro	µ	0,000 001	=	10^{-6}
nano	n	0,000 000 001	=	10^{-9}
pico	p	0,000 000 000 001	=	10^{-12}

Unités

Symbole	Unité	Observations
Masse		
g	gramme	-
t	tonne métrique	1 t = 1 Mg
lb	livre	1 livre = 453,592 g
Longueur		
m	mètre	-
pi	pied	1 pi = 0,3048 m
Volume		
l	litre	-
m^3	mètre cube	1 m^3 = 1000 l
m^3N	mètre cube normal	aux conditions normales: 25 °C, 101,325 kPa
cm^3	centimètre cube	
pi^3	pied cube	1 pi^3 = 0,02832 m^3

Unités (suite)

Symbole	Unité	Observations
Temps		
s	seconde	-
mn	minute	1 mn = 60 s
h	heure	1 h = 3600 s
Température		
°C	degré Celsius	-
°F	degré Farenheit	-
Pression		
bar	bar	-
Pa	pascal	1 Pa = 10^{-5} bar

Sigles

ASTM	American Society for Testing and Materials	
CUQ	Communauté urbaine de Québec	
EPA	Environmental Protection Agency	organisme américain
PNEEI	Programme national d'essais et d'évaluation des incinérateurs	Environnement Canada

Abréviations propres à l'échantillonnage et à l'analyse

AQ/CQ	assurance-contrôle de la qualité
EC	essai de caractérisation
EP	essai de performance
PCS	pouvoir calorifique supérieur
XAD-2	type de résines utilisées pour la séparation

Abréviations (suite)

Composés	
BPC	biphényles polychlorés
$Ca(OH)_2$	hydroxyde de calcium
CB	chlorobenzènes
CH_3OH	méthanol
CO	monoxyde de carbone
CO_2	dioxyde de carbone
CP	chlorophénols
CsCl	chlorure de césium
DDPC	dibenzodioxines polychlorées
DFPC	dibenzofurannes polychlorés
HAP	hydrocarbures aromatiques polycycliques
HC	hydrocarbures
HCl	chlorure d'hydrogène
HCT	hydrocarbures totaux (à chaud et à froid)
HF	fluorure d'hydrogène
HNO_3	acide nitrique
HOT	halogénures organiques totaux
LiCl	chlorure de lithium
MSD	matières en suspension dissoutes
NH_2OH . HCl	chlorhydrate d'hydroxylamine
NO_x	oxydes d'azote
O_2	oxygène
SO_2	dioxyde de soufre (anhydride sulfureux)

Métaux	
Ag	argent
Al	aluminium
As	arsenic
B	bore
Ba	baryum
Be	béryllium
Bi	bismuth
Ca	calcium
Cd	cadmium
Co	cobalt
Cr	chrome
Cu	cuivre
Fe	fer

Métaux (suite)

Hg	mercure
K	potassium
Mg	magnésium
Mn	manganèse
Mo	molybdène
Na	sodium
Ni	nickel
P	phosphore
Pb	plomb
Sb	antimoine
Se	sélénium
Si	silicium
Sn	étain
Te	tellure
Ti	titane
V	vanadium
Zn	zinc

Divers

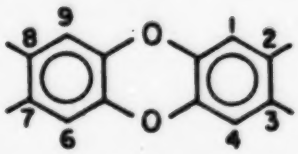
°	degré (angle ou température)
±	plus ou moins
<	plus petit que
>	plus grand que
n.d.	non détecté
ppb	parties par milliard
ppm	parties par million
s.o.	sans objet

Dibenzodioxines et dibenzofurannes polychlorés

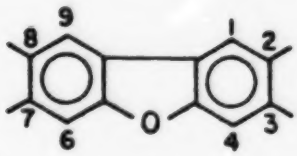
Les dibenzodioxines polychlorées* (DDPC) forment une famille de composés formés de deux anneaux de benzène réunis par deux atomes d'oxygène et comportant entre 1 et 8 atomes de chlore dans les anneaux (voir figure). On compte 75 dioxines chlorées qui diffèrent par l'emplacement et le nombre des atomes de chlore. Les dibenzodioxines tétrachlorées (DDTC) sont les 22 isomères différents des dioxines à quatre atomes de chlore. L'isomère connu sous le nom de 2,3,7,8-DDTC présente des atomes de chlore substitués aux positions 2,3,7 et 8. Les dibenzofurannes polychlorés (DFPC) constituent

* Le nom chimique complet est: dibenzo-*para*-dioxine polychlorée ou dibenzo-*p*-dioxine polychlorée.

une famille très semblable de composés chimiques qui ne diffèrent que par le fait qu'un seul des liens entre les noyaux de benzène contient un atome d'oxygène. La nomenclature des dibenzofurannes chlorés est analogue à celle des dibenzodioxines.



Dibenzodioxines polychlorées
(DDPC)



Dibenzofurannes polychlorés
(DFPC)

Homologues des dibenzo-*p*-dioxines polychlorées:

DDT4C Dibenzo-*p*-dioxine tétrachlorée
DDP5C Dibenzo-*p*-dioxine pentachlorée
DDH6C Dibenzo-*p*-dioxine hexachlorée
DDH7C Dibenzo-*p*-dioxine heptachlorée
DDO8C Dibenzo-*p*-dioxine octachlorée

Homologues des dibenzofurannes polychlorés:

DFT4C Dibenzofuranne tétrachloré
DFP5C Dibenzofuranne pentachloré
DFH6C Dibenzofuranne hexachloré
DFH7C Dibenzofuranne heptachloré
DFO8C Dibenzofuranne octachloré

DÉFINITIONS

Allure (des grilles)	Vitesse à laquelle se déplacent les grilles.
Chargeuse	Tracteur sur roues, muni à l'avant d'un godet se chargeant généralement à l'avancement et pouvant transporter les matériaux (front end loader en anglais).
Concentration	Comme ce mot a des sens multiples et parfois mal définis selon qu'il s'agit de chimie, de biologie et d'écologie, des termes jugés plus précis tels teneur, titre, bioconcentration sont préférables.
Décharge	Emplacement utilisé pour le dépôt de déchets solides (landfill).
Décharge contrôlée	Procédé d'élimination des déchets consistant à épandre les ordures sur un emplacement convenablement choisi et en respectant un certain nombre de règles permettant de supprimer les nuisances (sanitary landfill).
Eau régale	Mélange dans le rapport de 3 à 1 d'acide chlorhydrique à 35 % et d'acide nitrique à 65 %.
Électrofiltre (syn: dépoussiéreur électrique)	Appareil dans lequel les particules solides ou liquides sont captées par l'intermédiaire de forces électriques (*Remarque:* le phénomène n'étant pas électrostatique, cette dénomination doit être abandonnée).
Mise en décharge	Élimination des déchets dans une décharge.
Polluant	Agent physique, chimique ou biologique qui provoque une dégradation dans un milieu donné.
Registre	Obturateur entièrement ouvert en période d'exploitation normale et complètement fermé pour isolement, en cas de travaux par exemple. Il y a des registres de réglage, ces derniers étant en général du type à ventelles.
Teneur	Quantité de matière solide, liquide ou gazeuse, rapportée à une masse ou à un volume d'autres matières dans lesquelles elle est en mélange, suspension ou dissolution.
Valorisation énergétique	Utilisation du contenu énergétique des déchets.